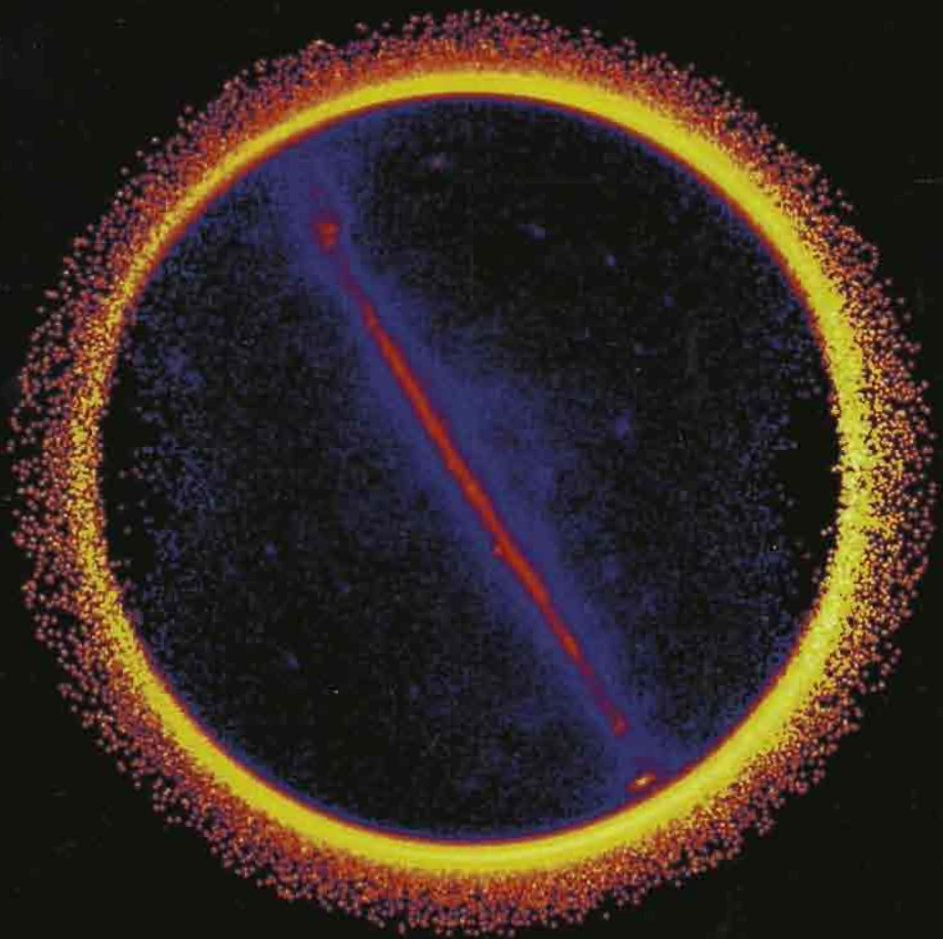


Los rayos cósmicos

Las energías más extremas
del universo



Un paseo por el
COSMOS



The Doctor y La Comunidad

Redigiralización: The Doctor

<http://thedoctorwho1967.blogspot.com.ar/>

<http://el1900.blogspot.com.ar/>

<http://librosrevistasinteresesanexo.blogspot.com.ar/>

<https://labibliotecadeldrmoeau.blogspot.com/>

Los rayos cósmicos

Las energías más extremas
del universo

RBA

Imagen de cubierta: Imágenes superpuestas obtenidas por el telescopio espacial de rayos gamma Fermi. El círculo grande es la Tierra, y en él se observan los rayos gamma producidos por los rayos cósmicos al penetrar en la atmósfera. La segunda imagen, en el centro, corresponde al plano galáctico.

Dirección científica de la colección: Manuel Lozano Leyva

© Manuel Masip Mellado por el texto
© RBA Contenidos Editoriales y Audiovisuales, S.A.U.
© 2016, RBA Coleccionables, S.A.

Realización: EDITEC

Diseño cubierta: Llorenç Martí

Diseño interior: tactilestudio

Infografías: Joan Pejoan

Fotografías: Archivo RBA: 10, 21; Vladimir Fedorenko/RIA Novosti: 75; International Fermi Large Area Telescope Collaboration, NASA, DOE: portada; KM3NeT Collaboration: 1330; KM3NeT Collaboration/Marco Kraan/Nikhef: 1331; NASA: 87, 130; NASA Goddard Space Flight Center: 122, 123; J.C. McConnell: 60; G. Pérez, IAC (SMM): 125; US Department of Energy: 97; USIAF: 121.

Reservados todos los derechos. Ninguna parte de esta publicación puede ser reproducida, almacenada o transmitida por ningún medio sin permiso del editor.

ISBN: 978-84-471-8886-1

Depósito legal: B00003-2016

Impreso y encuadernado en Godona, Vallarta (Navarra)

Impreso en España - Printed in Spain

SUMARIO

INTRODUCCIÓN	7
CAPÍTULO 1	Rayos cósmicos en la atmósfera 13
CAPÍTULO 2	Propagación a través del medio interestelar 49
CAPÍTULO 3	Aceleradores de rayos cósmicos 79
CAPÍTULO 4	Astropartículas neutras 109
LECTURAS RECOMENDADAS	143
ÍNDICE	145

te las preguntas fundamentales han sido: ¿Qué son los rayos cósmicos? ¿De dónde proceden? ¿Cómo han podido adquirir esas energías tan altas? Hoy sabemos que el fenómeno a explicar es, en realidad, mucho más complejo de lo que sugiere la simplicidad de su espectro, y que las respuestas van cambiando a distintas escalas de energía. Parece claro que los rayos cósmicos con una energía por encima de 1 GeV no tienen un origen solar (el gigaelectronvoltio, GeV, unidad usada en física de altas energías, equivale a $1,6 \cdot 10^{-10}$ julios). También hemos establecido que hasta energías en torno a 10^6 GeV, su principal fuente son los remanentes de supernova presentes en nuestra propia galaxia, mientras que más allá de 10^9 GeV, tienen un origen extragaláctico. Aunque es cierto que disponemos de un «modelo estándar» de los rayos cósmicos capaz de explicar numerosas observaciones, nuestra comprensión de los de muy alta energía es todavía parcial, y esos tres interrogantes persisten. En particular, los rayos cósmicos de energía en torno a 10^{11} GeV, que llegan a la Tierra con una frecuencia de uno por kilómetro cuadrado y siglo, siguen siendo un completo misterio.

La mayor parte de los rayos cósmicos son protones (85%), y el resto incluye todos los núcleos atómicos estables, electrones y una pequeña fracción de antipartículas (positrones y antiprotones). La radiación cósmica también incluye partículas neutras: neutrinos y fotones (rayos gamma) de alta energía, los cuales han sido accesibles experimentalmente solo durante las últimas décadas. De hecho, en la actualidad el término rayo cósmico suele reservarse para las partículas cargadas. Una diferencia fundamental entre estas y las neutras es que las segundas no se ven afectadas por los campos magnéticos presentes en el espacio interestelar, lo que permite que puedan ser usadas en astronomía. Al conjunto de todas las partículas procedentes del espacio exterior se las denomina *astropartículas*.

Una primera razón por la que son interesantes es que nos ofrecen una imagen del cosmos complementaria a la que nos brinda la luz en cualquier frecuencia. Neutrinos, rayos gamma y rayos cósmicos cargados representan, junto con las ondas gravitatorias detectadas recientemente por primera vez, canales de

observación alternativos. Su estudio nos da información esencial sobre la evolución de las estrellas, sobre la dinámica en las explosiones de supernova o sobre los campos y la materia que encuentran en el camino desde sus fuentes hasta la Tierra. Ese primer objetivo de la física de astropartículas coincide con el genérico de la astrofísica tradicional, y la diferencia básica entre uno y otro campo hay que buscarla en los métodos de detección. En el primer caso se observan partículas individuales mediante técnicas muy parecidas a las usadas en colisionadores de partículas. En contraste, la astrofísica se basa en la detección de un *continuo* de luz que puede tratarse como un campo electromagnético clásico. Así, los físicos de astropartículas que trabajan en *telescopios de rayos gamma* hablan de fotones de una cierta energía que serán observados individualmente, mientras que un astrofísico se refiere normalmente a la detección de luz en una cierta banda de frecuencias o de longitudes de onda. Por supuesto, esa radiación está formada por fotones (partículas de luz), pero en ese tipo de experimentos su naturaleza cuántica no es apreciable.

Además de la exploración del cosmos, un segundo objetivo en la física de rayos cósmicos ha sido el estudio de las propiedades fundamentales de las partículas elementales. De hecho, hasta la década de 1950 la radiación cósmica fue la única fuente de partículas de alta energía de la que se disponía, y a ella debemos la observación de fenómenos como la relación de Einstein entre masa y energía, la producción de pares electrón-positrón o el descubrimiento de partículas desconocidas hasta la fecha. El estudio de los rayos cósmicos constituyó entonces la principal motivación para el desarrollo de los primeros aceleradores: el Cosmotrón en Brookhaven y el Bevatrón en Berkeley, ambos en Estados Unidos. Tras un paréntesis de medio siglo, las astropartículas vuelven hoy a ser una herramienta útil en la exploración del microcosmos. Ello se ha debido, por un lado, al desarrollo tecnológico, que posibilita la construcción de grandes observatorios subterráneos o en el espacio. El tamaño del detector y la contaminación mínima que se obtiene en esos entornos son valiosísimos en la búsqueda de sucesos *raros* (poco frecuentes)

que se dan en estos experimentos. Por otro lado, la constatación de que la energía disponible en aceleradores de partículas parece haber alcanzado un límite difícil de superar a corto y medio plazo es un acicate para explorar las posibilidades que ofrecen los rayos cósmicos. La relevancia de las astropartículas en el estudio de la física fundamental es especialmente significativa en el caso de los neutrinos: dado que estas partículas interactúan muy débilmente con la materia, cualquier desviación debida a nueva física sería más fácilmente detectable que las que puedan darse en las colisiones de electrones o protones.

Desde un punto de vista práctico, los rayos cósmicos juegan un papel relevante en asuntos tan variados como la salud de los astronautas, la caída de rayos durante las tormentas, la química de la atmósfera, o incluso en los fallos «soft» que a veces se detectan en la electrónica que incorporan aviones y satélites. Su energía es suficiente para corromper un dispositivo de almacenamiento de datos o alterar una CPU (Unidad de Procesamiento Central), por lo que los rayos cósmicos justificarían argumentos como los propuestos por Stanley Kubrick en *2001: Una odisea del espacio*, película en la que el ordenador a cargo de una nave toma decisiones imprevisibles. Diversos estudios indican que, incluso en la superficie terrestre, la radiación cósmica induciría en torno a un error a la semana por cada gigabyte de memoria RAM. En 2008 Intel publicó un estudio sobre la posibilidad de que sus microprocesadores de alta densidad incorporasen un detector de rayos cósmicos que les hiciese repetir la última instrucción anterior a un suceso de ese tipo.

Los rayos cósmicos y las astropartículas en general continúan hoy fascinando a los investigadores. A pesar de todo el tiempo transcurrido desde su descubrimiento el campo vive una segunda juventud, con un nivel de actividad intensísimo y unos resultados espectaculares. Se modelan los mecanismos astrofísicos que originan a esas partículas, se simula su propagación o sus colisiones con núcleos de aire una vez penetran en la atmósfera, se proponen señales que podrían indicar la existencia de materia oscura u otra física no estándar y, sobre todo, se discuten nuevos métodos que permitan una mejor detección.

Respecto a este último punto, el principal desafío al que nos enfrentamos en la detección de las astropartículas de mayor energía es que, dado que son tan poco frecuentes, se precisan grandes volúmenes para registrar tan solo unos pocos sucesos. A menudo el *calorímetro* donde la partícula deposita su energía no puede construirse en el laboratorio, sino que debe buscarse en la propia naturaleza: básicamente, el experimento consiste en monitorizar una gran región de aire, agua o hielo. Ello se ha venido realizando con éxito en observatorios de rayos cósmicos como el Auger, capaz de «ver» 3000 km² de atmósfera sobre la región de Malargüe en Argentina. También se ha llevado a cabo en el *telescopio de neutrinos* IceCube, que registra deposiciones de energía en un bloque de 1 km³ de hielo de gran pureza 2 km bajo la superficie de la Antártida. En ANTARES y KM3NeT la idea es la misma, pero usando un gran volumen de agua en las profundidades del Mediterráneo. Y los avances experimentales no han consistido solamente en monitorizar volúmenes cada vez más grandes con detectores más sensibles, sino que técnicos y científicos han aguzado el ingenio en la búsqueda de nuevos caminos. Por ejemplo, en la Estación Espacial Internacional (EEI) se pretende complementar la detección de rayos cósmicos en el espacio que realiza el instrumento AMS con la detección desde el espacio que intentará JEM-EUSO: observará una gran región de la atmósfera con objeto de detectar la entrada de partículas de energía extrema. Otro ejemplo, quizá el más singular, lo proporciona el experimento LUNASKA, donde el «blanco» contra el que chocan las astropartículas es una porción significativa de la superficie lunar. La colisión de neutrinos ultraenergéticos podría producir una señal en radiofrecuencia detectable mediante telescopios en la Tierra.

El estudio de los rayos cósmicos y las astropartículas es, por tanto, un campo de investigación actual, en continuo progreso, que se beneficia de la colaboración entre astrofísicos y físicos de distintas especialidades: nucleares, de plasmas, de altas energías. El esfuerzo que la comunidad le está dedicando garantiza su futuro.

Aquí resumiremos los principios básicos de la física de los rayos cósmicos y abordaremos algunas de las cuestiones que en

la actualidad continúan abiertas. Empezaremos con una breve reseña histórica, destacando los experimentos que fueron claves para una correcta interpretación del fenómeno. Nuestro primer objetivo será entender cómo se manifiestan los rayos cósmicos una vez penetran en la atmósfera. En particular, analizaremos los procesos microscópicos que determinan la dinámica de las *cascadas atmosféricas*. Posteriormente discutiremos los tres observables básicos que podemos medirles: composición, dirección y espectro de energías. Ello nos servirá para deducir cuánto tiempo han estado viajando hasta alcanzar la Tierra y qué han encontrado por el camino. Nuestro siguiente objetivo será entender qué procesos astrofísicos han sido capaces de transferirles energías tan grandes y cuáles son los límites energéticos que pueden esperarse. Finalmente abordaremos el origen y las características de las astropartículas neutras. Como veremos, fotones y neutrinos de alta energía son «hijos» de los rayos cósmicos cargados, resultado de sus colisiones con otras partículas presentes en las regiones donde son acelerados o con el polvo y el gas en el medio interestelar donde se propagan.

Rayos cósmicos en la atmósfera

Los rayos cósmicos de alta energía penetran en la atmósfera y producen cascadas con millones de partículas secundarias. El estudio de la radiación cósmica nos revela las propiedades de las partículas elementales y también algunos de los peligros que nos acechan cuando abandonamos la protección de la atmósfera.

A principios del siglo xx un numeroso grupo de físicos centraba sus esfuerzos en comprender la radiactividad, descubierta de modo accidental por el francés Henri Becquerel en 1896. Los estudios de Ernest Rutherford en Canadá, de Paul Villard, Pierre y Marie Curie en Francia, y de otros muchos establecieron la existencia de *materiales radiactivos*, llamados así por su similitud con el radio, que emiten una sustancia invisible al ojo humano pero capaz de atravesar cuerpos opacos o de *ionizar* el medio circundante.

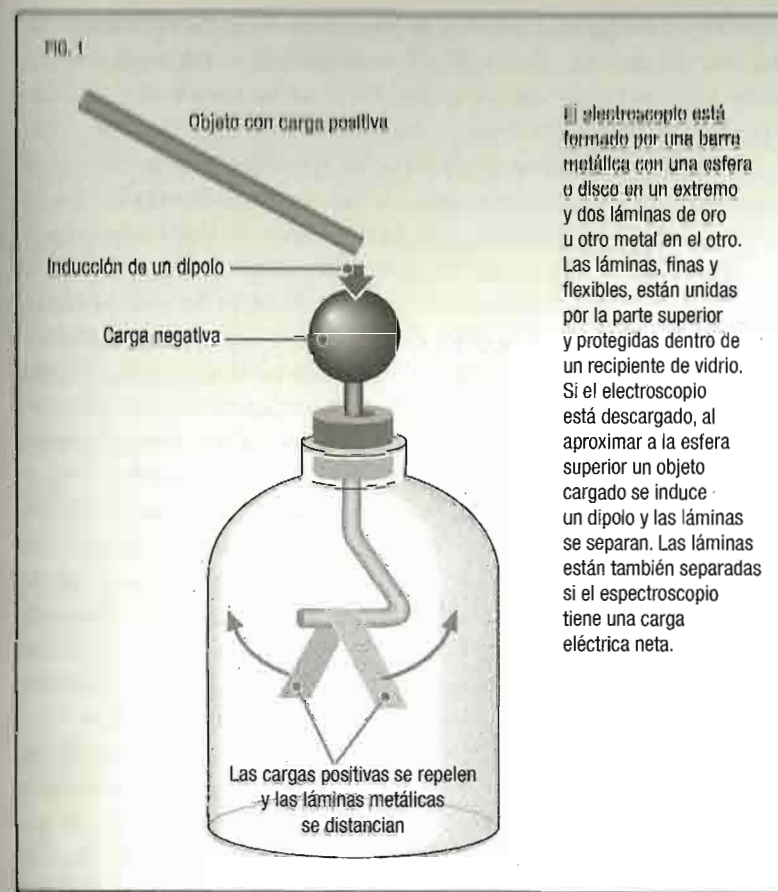
El estudio de este último proceso, la ionización, fue la clave que condujo a los *rayos cósmicos*. Ionizar un medio consiste en arrancar electrones de los átomos o moléculas que lo componen, de modo que se liberan iones con carga positiva (cationes) y negativa (aniones). Se dedujo que estaba ocurriendo al observarse que materiales como el uranio o el polonio eran capaces de eliminar la carga eléctrica de un objeto cercano. La única explicación plausible que se encontró a este fenómeno fue la ionización: la radiación natural producida por dichos materiales va dejando a su paso por el gas en la proximidad del objeto una estela de partículas cargadas; si el objeto está cargado atraerá y absorberá

a los iones de carga opuesta, lo que irá reduciendo su carga inicial. Los experimentos se realizaron usando *electroscopios* cargados (figura 1), que perdían rápidamente su carga en presencia de materiales radiactivos.

En el año 1900, con el desarrollo de aparatos más sensibles, se observó que los electroscopios perdían carga incluso cuando no había materiales radiactivos en su proximidad. Por tanto, el aire debía contener algún tipo de radiación capaz de penetrar en el recipiente hermético que protegía al electroscopio, ionizar el gas interior y descargarlo. ¿Proviene esa radiación de materiales en el suelo o es inherente al mismo aire? En 1909, el físico y jesuita alemán Theodor Wulf buscó la respuesta repitiendo el experimento a 330 m de altura, en la cima de la torre Eiffel. Si el origen de esa radiación fuesen materiales en la corteza terrestre entonces el ritmo de descarga del electroscopio debería reducirse. Los resultados fueron indistinguibles de los obtenidos abajo, pero el estudio de la ionización del aire a distintas alturas pasó a ser un tema prioritario. Ese mismo año el también alemán Karl Bergwitz realizó el experimento en un globo aerostático a 1300 m: el ritmo de ionización del aire parecía reducirse, lo que apoyaba un origen terrestre.

Fue el austriaco Victor Hess quien en 1911-1912 demostró claramente que la cantidad de iones atmosféricos aumentaba a partir de una cierta altura y, por tanto, que la radiación que los originaba debía ser extraterrestre. Hess realizó una serie de diez vuelos en globo en los que llegó a alcanzar una altura de 5200 m (¡sin máscara de oxígeno!), cinco de ellos de noche. Al no observar diferencias apreciables entre los datos diurnos y nocturnos dedujo que la radiación no provenía del Sol. Hess, premio Nobel de Física en 1936, es considerado el descubridor de los rayos cósmicos.

Durante los años siguientes el debate se centraría en cuál es la naturaleza de esa radiación cósmica capaz de atravesar toda la atmósfera. Se conocían tres tipos de rayos emitidos por los núcleos radiactivos: alfa (núcleos de helio), beta (electrones) y gamma (fotones). Estos últimos eran el candidato natural por su alto poder de penetración. Sin embargo, en 1927 el holandés Ja-



rob Clay encontró que la radiación es menos intensa en el ecuador que a latitudes altas. El fenómeno, explicado por el físico estadounidense Arthur Compton en 1932, estaría causado por la acción del campo magnético de la Tierra sobre los rayos cósmicos si estos poseen, mayoritariamente, carga eléctrica, lo que eliminaba a los rayos gamma como candidatos.

La invención del contador de Geiger-Müller en 1928 permitió la detección de las partículas individuales que forman la radiación cósmica. En 1938 el francés Pierre Auger y sus colaboradores encontraron que dos detectores separados por una distancia

de 200 m podían registrar la entrada simultánea de radiación. Ello era un indicio claro de que, en realidad, se estaban observando las partículas secundarias producidas por un mismo rayo cósmico primario. Estimaron que la energía total de esos sucesos extensos debía estar en torno a 10^6 GeV, muchísimo más grande que la energía típica con la que son producidas las partículas en procesos radiactivos, la cual está en torno a 1 MeV (megaelectronvoltio). La cuestión principal pasó entonces a ser qué proceso astrofísico era capaz de acelerar rayos cósmicos hasta semejantes energías. En 1949, el físico italiano exiliado en Estados Unidos Enrico Fermi propuso un mecanismo genérico que

explicaría la transferencia de energía de un plasma en movimiento a partículas individuales.

Paralelamente, en el año 1912, el desarrollo de la cámara de niebla por el escocés Charles Wilson hizo posi-

ble seguir las trazas que se forman cuando las partículas cargadas atraviesan un gas saturado (vapor de agua o alcohol). Los iones que una partícula cargada en movimiento va produciendo actúan como núcleos de condensación, y las gotitas que aparecen permiten reconstruir su trayectoria y distinguir, por el tamaño de las gotas, si se trata de un electrón o un núcleo de helio. En presencia de un campo magnético la traza también indica si la partícula tiene carga positiva o negativa. Durante la década de 1930 el análisis de la radiación cósmica en cámaras de niebla reveló que hay ocasiones en que la colisión de una partícula crea otras partículas distintas, verificándose la relación entre masa y energía de Einstein. En 1936, el estadounidense Carl Anderson descubrió el antielectrón (o positrón), que había sido postulado por el físico teórico inglés Paul Dirac en 1928 como parte de su modelo de mecánica cuántica relativista. También se descubrieron una partícula similar en masa al protón pero sin carga, el neutrón, y otra de masa intermedia entre las del protón y el electrón, cargada pero inestable, el muon. Hasta la llegada de los primeros aceleradores dos décadas más tarde los rayos cósmicos fueron la única fuente de partículas elementales de la que dispusieron los físicos.

Un hombre debe buscar lo que es,
no lo que él cree que debería ser.

ALBERT EINSTEIN

EL INTROVERTIDO GENIO DE PAUL DIRAC

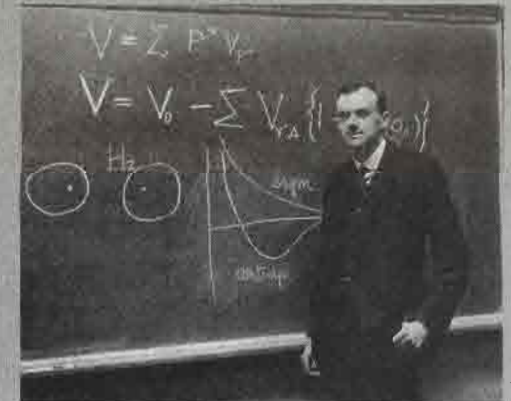
Dirac fue un físico inglés nacido en 1902 y uno de los mayores genios que dio la ciencia del siglo XX. Su brillantez como matemático y físico queda resumida en la ecuación que lleva su nombre. La ecuación de Dirac hace compatible la mecánica cuántica con la relatividad, predice la existencia de la antimateria, y es capaz de describir el curioso comportamiento de los sistemas de fermiones idénticos. Podría argumentarse que esa ecuación está a la par con las propuestas por Newton, Maxwell o Einstein antes que él.

La personalidad de Dirac

El genio de Dirac fue admirado por sus colegas y amigos Werner Heisenberg, Wolfgang Pauli o Niels Bohr, quienes en mayor o menor medida también llegaron a considerar entrañable su peculiar personalidad: muy silencioso, solemne, tímido, dedicado en cuerpo y alma a la física. Albert Einstein llegó a decir de él que «estos equilibrios para mantenerse entre el genio y la locura son horribles». Preguntado por la prensa sobre sus logros científicos, Dirac se negó a explicarlos diciendo que las teorías cuánticas se basan en «conceptos físicos que no pueden en absoluto ser explicados con palabras».

Un premio Nobel precoz

Tras graduarse en ingeniería eléctrica a los diecinueve años se interesó por las ciencias puras y volvió a graduarse, esta vez en matemáticas; se doctoró a los veinticuatro años en Cambridge; se trasladó a Copenhague para conocer a Niels Bohr, quien murmuró a Ernest Rutherford: «este Dirac parece que sabe mucha física, pero no dice nunca nada...». A los treinta y un años ya tenía el premio Nobel de Física. Su biógrafo Graham Farmelo cuenta innumerables anécdotas en *The Strangest Man*. Cuando Bohr le comentó que no sabía cómo acabar la frase en un artículo que estaba escribiendo, Dirac le replicó que «en el colegio me enseñaron a no empezar nunca una frase sin saber cómo termina». Durante un viaje en barco a una conferencia en Japón le preguntó al «conquistador» Heisenberg por qué bailaba, y este replicó «cuando hay chicas amables, es un placer». Tras cinco minutos de silencio añadió: «Heisenberg, ¿y cómo sabes de antemano que la chica es amable?». Sin embargo, Dirac mutó misteriosamente de su casi autismo a hombre con opiniones sobre política o religión, con destellos de amabilidad en el trato con algunos amigos; llegó incluso a casarse a los treinta y cinco años y a ser un buen esposo y padre. Murió en Florida en 1984, a los ochenta y dos años de edad.



Una gran parte de mi trabajo consiste en jugar con las ecuaciones y ver qué proporcionan.

PAUL DIRAC

Tras estos estudios, a finales de la década de 1930 existía cierto consenso sobre la naturaleza de los rayos cósmicos. Se trataba de núcleos atómicos relativistas, algunos de ellos de altísima energía, procedentes del espacio exterior. Al entrar en la atmósfera y chocar con el aire, esos rayos cósmicos primarios desencadenaban una cascada (*air shower*) de partículas secundarias. La radiación observada estaba formada por la fracción de esas partículas secundarias que alcanzaban la superficie terrestre, e incluía una componente *blanda* con fotones, electrones y positrones y otra más *dura* (penetrante) compuesta por muones negativos y positivos (o antimuones).

LA ATMÓSFERA COMO MEDIO PARA LOS RAYOS CÓSMICOS

La atmósfera se extiende hasta una altura más allá de 100 km, aunque el 75% de su masa se encuentra por debajo de 11 km. El aire (conjunto de gases atmosféricos) está formado en un 78% por nitrógeno y en un 21% por oxígeno, además de por pequeñas cantidades de argón, vapor de agua y dióxido de carbono.

La atmósfera nos separa del espacio exterior, y su estructura determina en gran medida la cantidad y la naturaleza de la radiación cósmica secundaria que observamos en la superficie terrestre. Esa radiación representa solo una pequeña fracción de la energía con la que llegan los rayos cósmicos primarios, ya que se va degradando conforme cruza la atmósfera: se divide en cada colisión con átomos de aire y es parcialmente absorbida en su camino al suelo.

Un concepto básico usado en física de rayos cósmicos es el de *profundidad* entre dos puntos. La profundidad X expresa la cantidad de materia que encuentra una partícula cuando se desplaza entre esos puntos. Si la densidad ρ del medio es constante y la distancia entre los puntos es L , X se define como el producto

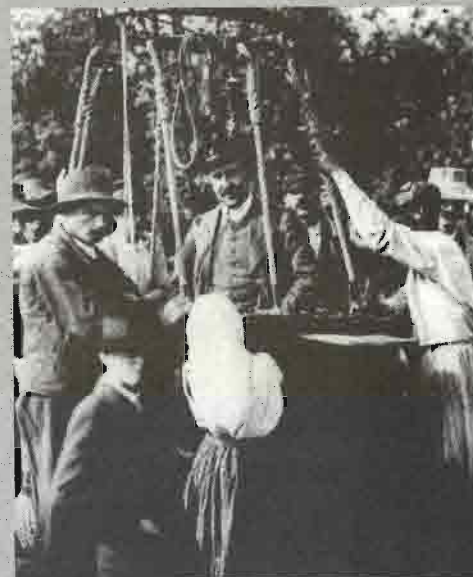
$$X = \rho L.$$

LOS PIONEROS EN LA INVESTIGACIÓN DE LOS RAYOS CÓSMICOS

El austriaco Victor Hess está considerado el descubridor de los rayos cósmicos, logro reconocido con el premio Nobel de Física en 1936. Pero el suyo no fue un esfuerzo solitario, sino que en la búsqueda participó un gran número de científicos. Entre ellos podríamos nombrar a los alemanes Theodor Wulf y Werner Kolhörster, el suizo Albert Gockel, el italiano Domenico Pacini o el estadounidense Robert Millikan. Los tres primeros realizaron un trabajo de campo especialmente delicado y con riesgo evidente para su integridad: tomaron las medidas a bordo de globos aerostáticos a miles de metros de altura, mientras que Pacini estudió cuáles son los niveles de radiación ionizante en las profundidades de un lago.

Los rayos de Millikan

La búsqueda del origen de esa radiación tuvo algo de carrera por llegar primero, lo cual es obviamente lógico y natural, aunque no siempre se siguieron las normas de *fair play* que cabría esperar. En particular, Millikan entró en esa carrera cuando ya era un físico experimental famoso; tras obtener el premio Nobel en 1923. En 1913, Hess había demostrado que la radiación ionizante provenía del espacio exterior, pero Millikan consiguió llevar un electroscopeco a 15 km de altura y observó una reducción en la cantidad de dicha radiación. En 1925 publicó que «toda la radiación observada es de origen local» (no exterior). Al año siguiente, sin embargo, Millikan completó sus experimentos tanto en el aire a gran altura como en el fondo de un lago y corrigió su conclusión inicial: se trataba de «rayos gamma de alta energía que se propagan en todas direcciones a través del espacio». En esta última publicación ni siquiera citaba el trabajo previo de Hess, pero le sirvió para que la prensa y prestigiosas revistas como *Science* los bautizaran como *rayos de Millikan* o *rayos cósmicos*. Hess incluyó un amargo comentario en una publicación también en 1926: «el trabajo de Millikan es solo una confirmación y ampliación de los resultados obtenidos por Gockel, Kolhörster y yo mismo entre 1910 y 1913 utilizando globos sonda para la medida de estos rayos. No reconocer nuestro trabajo es un error y no está justificado». Seis años después, Millikan tuvo un debate todavía más agrio con su compatriota Arthur Compton, quien defendía la naturaleza cargada de los rayos cósmicos.



Victor Hess iniciando un vuelo en globo en 1912.

FIG. 2



Columnas de materia equivalentes, de distinta longitud L y densidad ρ pero con una misma profundidad $X = \rho L$. La partícula incidente tiene la misma probabilidad de chocar al atravesar una u otra columna, puesto que en ambos casos se cruzará con 5 blancos.

Es decir, la profundidad aumenta con la distancia y con la densidad del medio. La magnitud X es muy útil para describir la propagación de una partícula en el seno de un gas o un sólido, ya que la probabilidad de que se produzca un choque con las partículas del medio solo dependerá del número total de blancos que encuentre en su camino, no de si la distancia que ha recorrido para cruzarse con ellos ha sido más o menos larga. Ello se describe gráficamente en la figura 2.

La profundidad da una idea de la capacidad del medio para frenar y absorber a una partícula cuando esta lo cruza. Tomemos por ejemplo el aire. Su densidad está en torno a $0,001 \text{ g/cm}^3$, 1000 veces más pequeña que la del agua. Si tomamos una columna de $10 \text{ km} = 10^6 \text{ cm}$ de aire de esa misma densidad obtenemos

$$X = (10^{-3} \text{ g/cm}^3) \cdot (10^6 \text{ cm}) = 1000 \text{ g/cm}^2.$$

Aunque la densidad del aire disminuye con la altura, esos 1000 g/cm^2 representan muy aproximadamente la profundidad real de la atmósfera desde sus confines a más de 100 km de altura hasta la propia superficie terrestre. Pues bien, esa profundidad coincide con la correspondiente a una columna de 10 m de agua.

PROFUNDIDAD TOTAL DE LA ATMÓSFERA

La densidad del aire depende de la altura a la que nos encontremos según la expresión aproximada

$$\rho(h) = \rho_0 e^{-h/h_0},$$

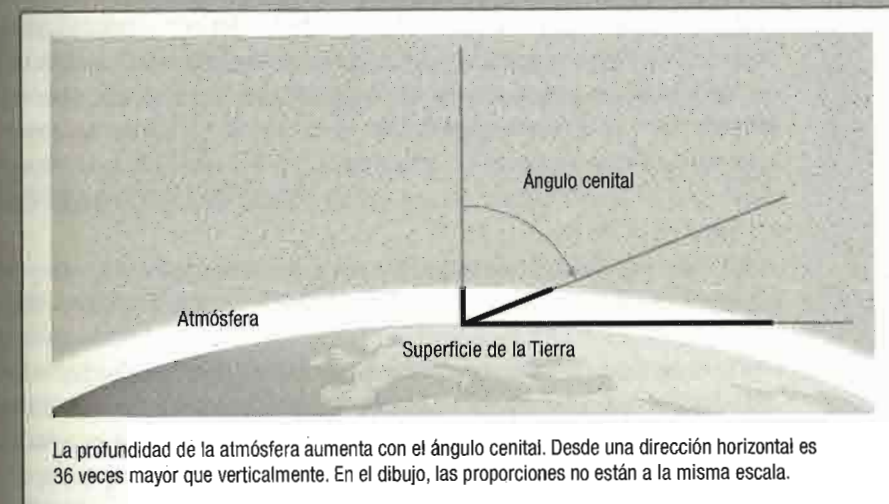
donde $\rho_0 = 1,22 \cdot 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ y $h_0 = 8,2 \text{ km}$. Esa expresión nos indica que la atmósfera va haciéndose más tenue con la altura: su densidad se reduce en un factor $e^{-1} = 0,37$ cada 8,2 km. La profundidad que encuentra un rayo cósmico cuando atraviesa la atmósfera verticalmente desde el espacio exterior hasta un punto a altura h se obtiene mediante la integral

$$X_h = \int_h^\infty \rho dh = \rho_0 h_0 e^{-h/h_0}.$$

Para obtener la profundidad hasta el suelo tomamos $h=0$, resultando $X_0 = 1000 \text{ g/cm}^2$. Es asimismo importante notar que la profundidad de la atmósfera crece con la inclinación cenital, es decir, con el ángulo relativo a la vertical, llegando a ser 36 veces mayor horizontal que verticalmente (véase la figura).

El muro atmosférico

La atmósfera nos protege de los rayos cósmicos del mismo modo que lo harían 10 metros de agua o un muro de cemento de 4 metros y medio de grosor: suficiente para absorber la mayor parte de la radiación cósmica. En un vuelo transatlántico a 11 000 m de altitud, esa protección se reduce a tan solo una cuarta parte: sería la equivalente a 2,5 m de agua.



La profundidad de la atmósfera aumenta con el ángulo cenital. Desde una dirección horizontal es 36 veces mayor que verticalmente. En el dibujo, las proporciones no están a la misma escala.

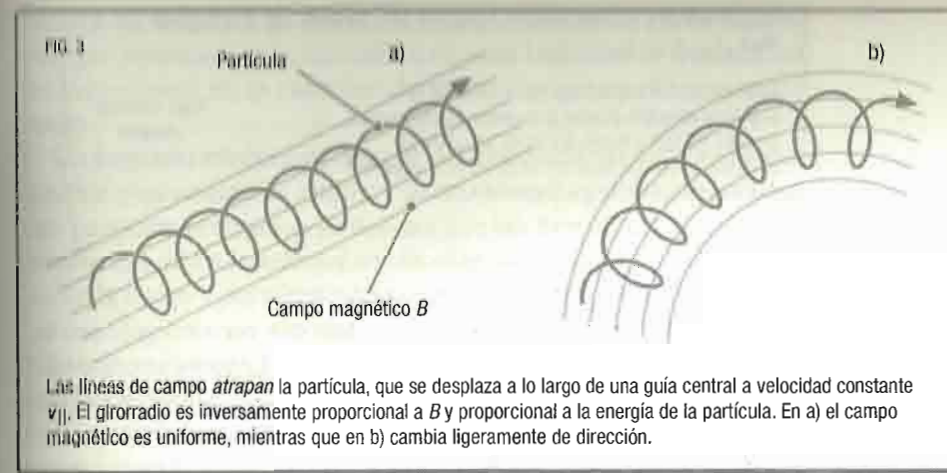
EL PECULIAR MOVIMIENTO DE UNA CARGA EN EL SENO DE UN CAMPO MAGNÉTICO

Una característica fundamental de los rayos cósmicos primarios es que se trata de partículas cargadas. Su trayectoria será, por tanto, sensible a la presencia de campos magnéticos. Dichos campos aparecen en el universo prácticamente a cualquier escala, desde los planetas a los cúmulos de galaxias. Discutiremos en cierto detalle los efectos magnéticos de la Tierra y del Sol.

En general, la fuerza que ejerce un campo magnético B sobre una partícula cargada tiene la peculiaridad de que es perpendicular a la velocidad de la partícula. Como consecuencia, en lugar de empujarla en la dirección de su movimiento, aumentando así su energía cinética, tan solo curvará su trayectoria. Los campos magnéticos estáticos son incapaces de aumentar la energía de una partícula cargada, se precisan campos eléctricos o, como veremos en próximos capítulos, campos magnéticos en movimiento para que esta gane o pierda energía.

La fuerza magnética es también perpendicular al campo B , por lo que la componente de la velocidad en esa dirección no cambiará. Es fácil por tanto adivinar que en el seno de un campo uniforme y estático (figura 3a) la partícula describe una trayectoria helicoidal: es la superposición de un movimiento rectilíneo de velocidad constante $v_{||}$ en la dirección de B y otro circular de giro radio r_g . Las líneas de campo en la figura 3 indican la dirección del campo magnético y también su intensidad, que viene dada por la densidad de líneas en un punto: cuanto más juntas estén, mayor es B .

Es también posible demostrar que si el campo cambia un poco de dirección mientras la partícula realiza un giro (figura 3b), esta tiende a *derivar* a lo largo de la línea de campo en su centro de giro, la cual guía su movimiento global. El campo magnético actuaría como una fuerza centrípeta que atrapa a la partícula y solo permite el *transporte paralelo* al mismo. Obviamente, para que la partícula no escape es necesario que la región de coherencia de B sea suficientemente grande, mayor que su radio de giro.



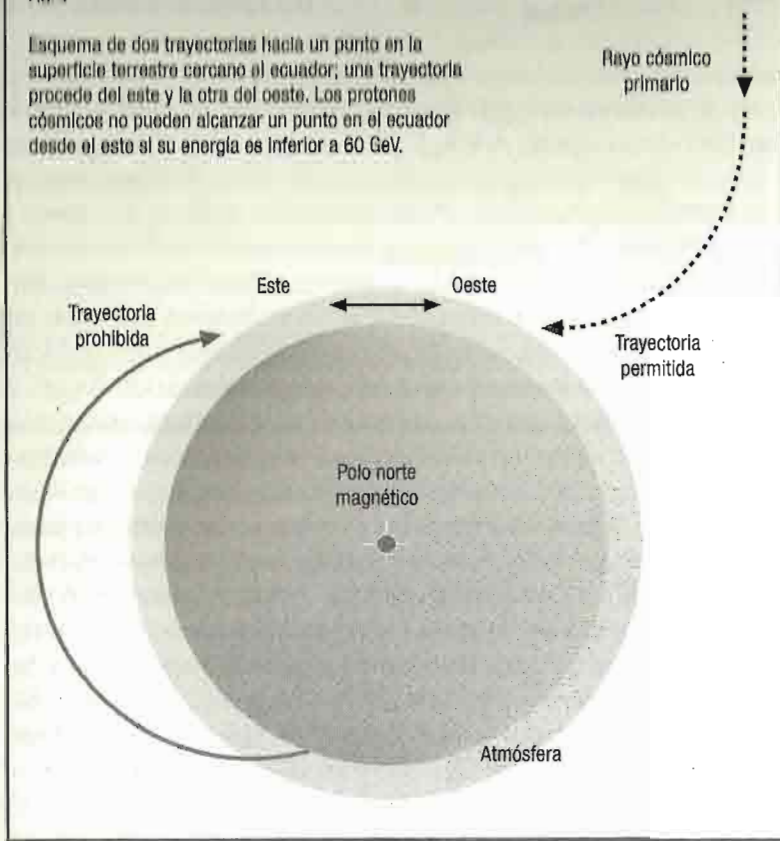
Otro efecto de gran relevancia en relación con los rayos cósmicos se da cuando la intensidad del campo magnético no es constante sino que cambia lentamente en la dirección de deriva. Si las líneas de campo tienden a juntarse, lo que indica un incremento en la intensidad, aparece una pequeña fuerza opuesta a $v_{||}$ que disminuye la velocidad de deriva de la partícula. El efecto es acumulativo, y puede incluso cambiar el sentido de la deriva. El rebote que sufren las partículas cargadas al acercarse a una zona con campo más intenso se denomina efecto *espejo magnético*.

EFFECTOS GEOMAGNÉTICOS

Estamos ya en disposición de discutir la influencia del campo magnético terrestre o *magnetosfera* sobre los rayos cósmicos. En primer lugar, el llamado *efecto este-oeste* (figura 4), que es el responsable del aumento de radiación cósmica con la latitud observado por Compton. El campo magnético de la Tierra es perpendicular al plano ecuatorial, tiene una magnitud en torno a 0,3 gauss cerca del suelo, y disminuye con la altura h como $1/(h + R_{\oplus})^3$. Vistos desde el norte los rayos cósmicos cargados positivamente que se mueven en el plano ecuatorial giran en sentido horario, con un ra-

FIG. 4

Esquema de dos trayectorias hacia un punto en la superficie terrestre cercano al ecuador; una trayectoria procede del este y la otra del oeste. Los protones cósmicos no pueden alcanzar un punto en el ecuador desde el este si su energía es inferior a 60 GeV.



dio de curvatura que será inferior al radio de la Tierra si su energía está por debajo de 60 GeV. Con esas premisas, resulta evidente que no existen trayectorias procedentes del espacio exterior que penetren en la atmósfera desde el este. Esas trayectorias están «tapadas» por la propia Tierra: definen una especie de sombra de la Tierra para los rayos cósmicos en ese rango de energías.

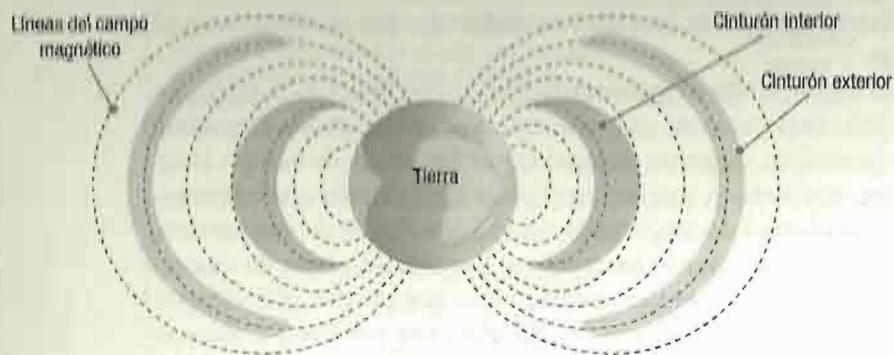
En contraste, en los polos el campo geomagnético no es tan fuerte sino perpendicular a la superficie terrestre. En latitudes altas las trayectorias de los rayos cósmicos tienden a estar más alineadas con el campo, lo que disminuye la fuerza magnética y

facilita su llegada a la Tierra. El mayor número de rayos cósmicos que penetran en la atmósfera en esas latitudes se traduce en un incremento en la cantidad de radiación que se observa en el suelo.

Un segundo efecto interesante del campo magnético terrestre son los *cinturones de radiación de Van Allen*. Están formados por partículas cargadas atrapadas por las líneas de campo magnético, que tiene la estructura dipolar aproximada que se muestra en la figura 5. La trayectoria espiral que siguen dichas partículas experimenta un efecto espejo al llegar a las zonas de campo más intenso cercanas a los polos, por lo que pueden permanecer atrapadas en los cinturones indefinidamente (escapan al chocar con otras partículas del medio o a través de irregularidades en el campo magnético). Además del movimiento entre los polos, los protones experimentan una deriva hacia el oeste y los electrones hacia el este.

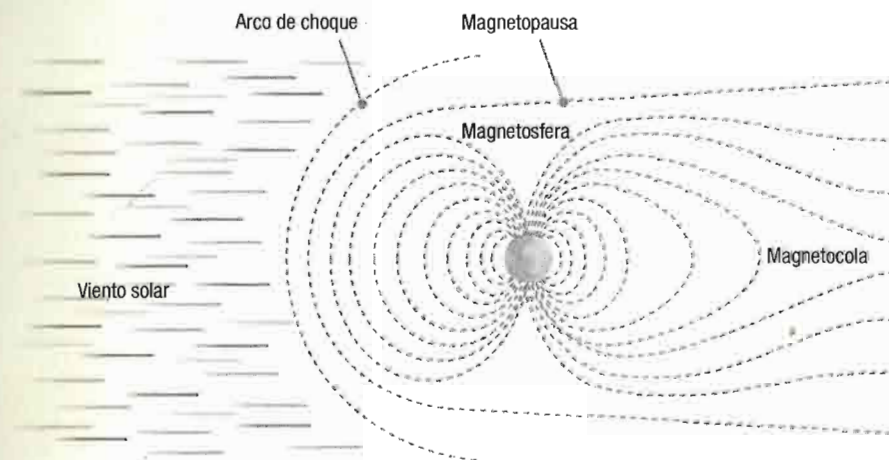
Puede distinguirse un cinturón exterior a distancias de unos seis radios terrestres que contiene casi exclusivamente electrones de energía por debajo de 10 MeV y otro interior con electrones y protones de hasta 100 MeV. Son partículas que provienen del Sol (figura 6) y de las colisiones de rayos cósmicos mucho más energéticos con partículas en la alta atmósfera. La presencia de la atmósfera, precisamente, dificulta la formación de cinturones a distancias inferiores a unos 1 000 km. No obstante, debido a la inclinación de 11° del eje de rotación de nuestro planeta respecto al eje magnético, y a que ambos ejes no se cruzan en el centro de la Tierra sino unos 500 km al norte, el cinturón interior se aproxima más a la superficie terrestre en latitudes sur. En particular, se observa la llamada *Anomalía del Atlántico Sur*, con una alta densidad de radiación a unos 200 km de la superficie terrestre (véase la imagen de las págs. 30-31). En 2011, el instrumento satelital PAMELA (*Payload for Antimatter Matter Exploration and Light-nuclei Astrophysics*) detectó gran cantidad de antiprotones al atravesar la anomalía, lo que indica que probablemente se trata de partículas secundarias producidas en las colisiones de los rayos cósmicos de alta energía al entrar en la atmósfera.

FIG. 5



Esquema de la posición de los cinturones de Van Allen dentro de la magnetosfera terrestre. Se muestran también las líneas del campo magnético.

FIG. 6



Viento solar y estructura a gran escala de la magnetosfera terrestre. La magnetopausa es el límite donde termina la magnetosfera. Por acción de este viento de partículas procedente del Sol, la magnetosfera está algo aplastada en la cara diurna y algo estirada en la nocturna. El límite frontal en el sector diurno tiene forma arqueada y se le conoce como arco de choque, entre otros nombres. La parte opuesta y alargada, en el sector nocturno, recibe el nombre de magnetocola.

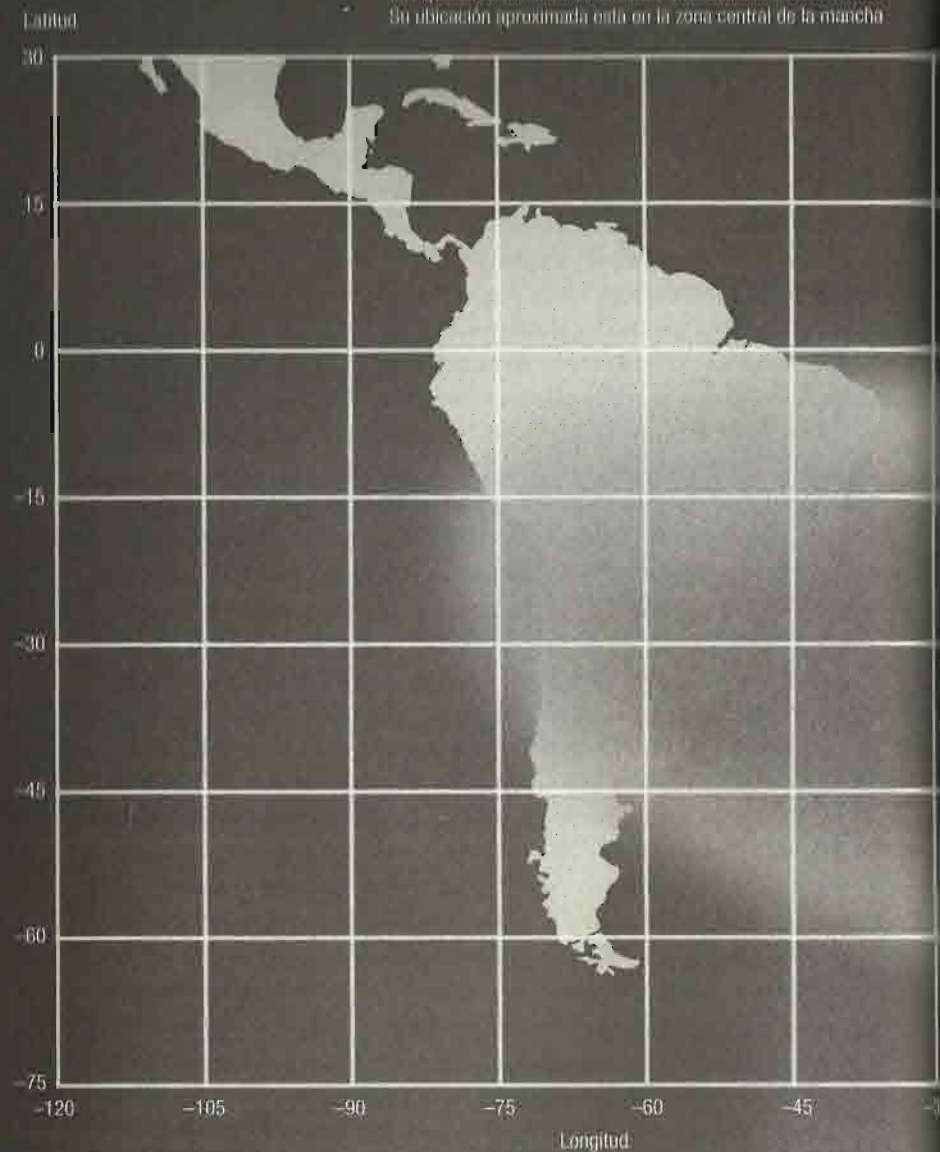
La gran densidad de radiación en los cinturones de Van Allen representa un peligro para los instrumentos más sensibles de los satélites, que deben estar protegidos si su trayectoria se solapa significativamente con ellos. La Estación Espacial Internacional se encuentra en una órbita baja, por debajo del cinturón interior, mientras que los satélites GPS orbitan en una zona de relativa calma entre ambos cinturones.

Un último efecto genérico del campo magnético terrestre, de gran importancia para nosotros, es que evita que el *viento solar* alcance la atmósfera. Dicho viento está formado por electrones y protones de energía en torno a 0,01 MeV emitidos continuamente por la atmósfera solar y que (normalmente) son incapaces de penetrar en la magnetosfera (figura 6). En ausencia del campo magnético terrestre, el viento solar erosionaría nuestra atmósfera, lo que a largo plazo podría tener consecuencias graves. En particular, podría destruir la capa de ozono, que nos protege de la radiación ultravioleta procedente del Sol.

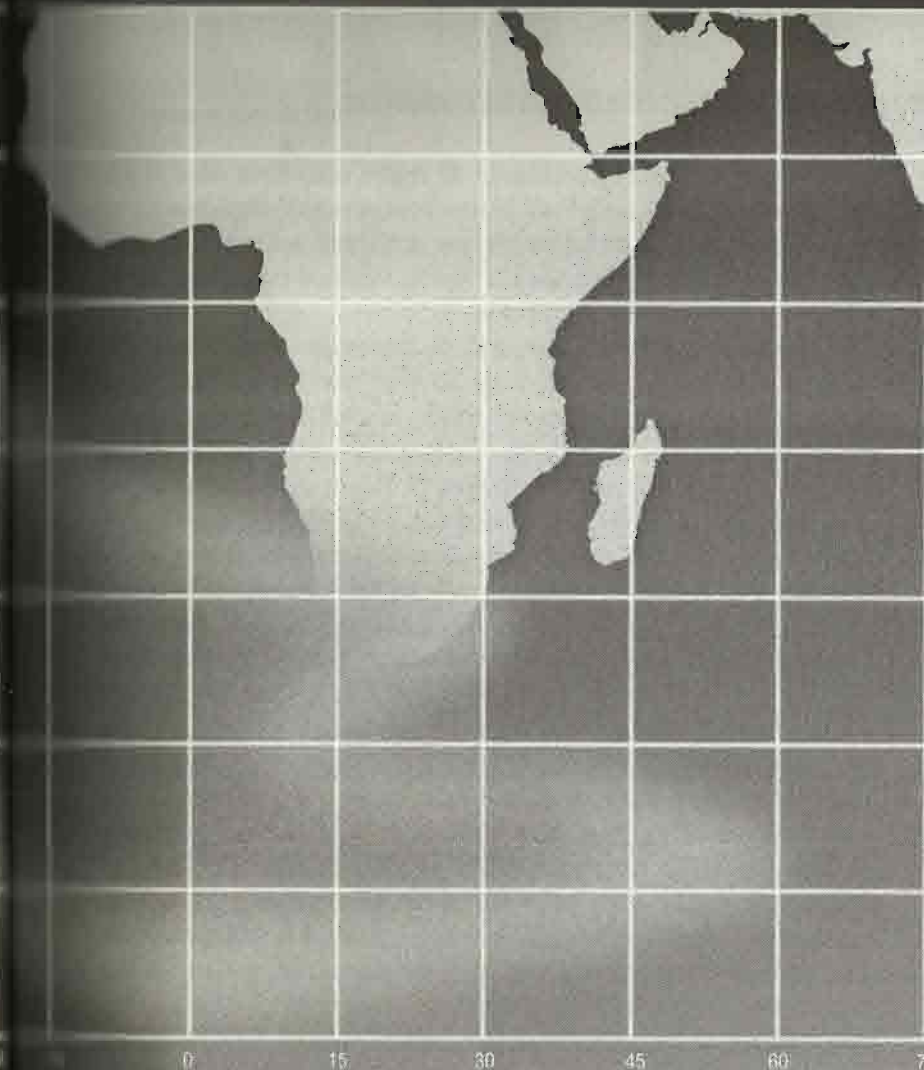
En periodos de gran actividad se observan las *llamaradas solares*: brillos repentinos en la superficie del Sol que se interpretan como intensas emisiones de energía. Esos procesos son capaces de acelerar rayos cósmicos (electrones, protones y núcleos pesados) hasta energías en torno a 1 GeV y de debilitar a la magnetosfera, que se muestra incapaz de contener totalmente al intenso viento solar. Aunque la protección que nos brinda la atmósfera hace que no resulten peligrosos para la salud, la mayor ionización del aire durante esos episodios puede dañar centrales de energía o sistemas de comunicación, producir incendios y crear espectaculares auroras boreales. El 1 de septiembre de 1859 tuvo lugar el conocido como *Suceso Carrington*, una llamarada solar que alcanzó la Tierra en solo 18 horas cuando el tiempo usual son tres días. Llegó a provocar descargas eléctricas a los operadores de telégrafo en Europa y Estados Unidos, y la aurora boreal que produjo pudo verse en Cuba. La traza que este tipo de sucesos ha dejado en los hielos polares revela que solo ocurren una vez cada 500 años, aunque los episodios no tan extremos son mucho más frecuentes. Durante las tormentas solares los astronautas en la EEI se protegen de dosis de radiación que podrían ser letales

LA ANOMALIA DEL ATLANTICO SUR

La Anomalia del Atlantico Sur recibe este nombre porque en el espacio ocupado por ella hay un flujo de partículas muy superior a lo que es habitual en otras zonas situadas a la misma altitud. Su ubicación aproximada está en la zona central de la mancha



mostrada en el mapa. La extensión geográfica de la anomalía varía dependiendo de la altitud sobre la superficie terrestre. Los satélites artificiales y otros vehículos espaciales que atraviesan la anomalía afrontan una mayor incidencia de interferencias y riesgo de averías.



evitando los paseos espaciales y buscando las zonas de la estación más protegidas. Irónicamente, los periodos de mayor actividad solar reducen su exposición a la radiación que es realmente dañina para ellos: la debida a los rayos cósmicos procedentes de fuera del sistema solar.

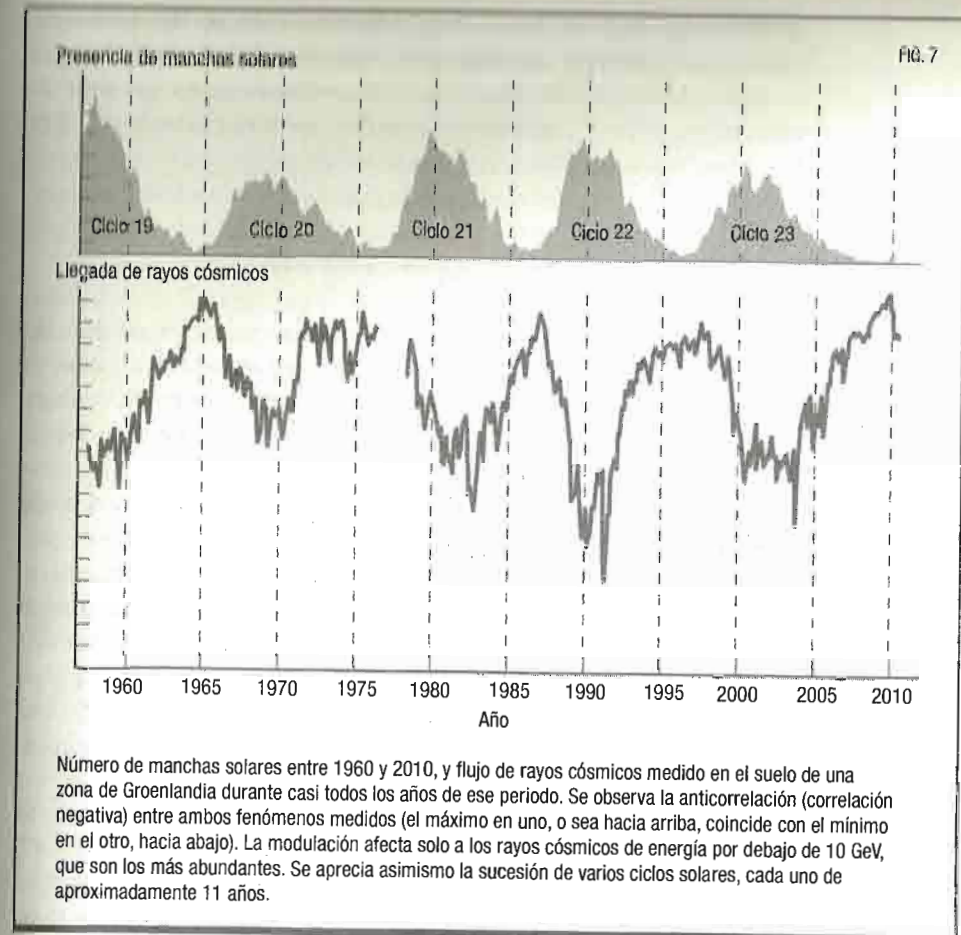
EFFECTOS DEL SOL EN LOS RAYOS CÓSMICOS

El Sol no es la fuente dominante de rayos cósmicos de energía cinética por encima de 1 GeV. Como acabamos de mencionar, se da más bien el efecto contrario: una actividad solar alta reduce la llegada de rayos cósmicos a la Tierra. Veamos cuál es el mecanismo que explica este fenómeno.

El viento solar incluye, además de electrones, protones y núcleos pesados, campo magnético. El flujo continuo emitido por el Sol forma en su entorno una *burbuja* de plasma magnetizado que llamamos *heliosfera*, la cual se extiende hasta distancias de unas 120 unidades astronómicas (1 UA es la distancia entre la Tierra y el Sol, unos 8,3 minutos-luz o $1,5 \cdot 10^{11}$ m). Aunque el magnetismo solar es mucho menos estable que el terrestre, la heliosfera es capaz de soportar la presión del espacio interestelar de donde proceden los rayos cósmicos de modo parecido a como la magnetosfera se opone al viento solar, dificultando la entrada de partículas cargadas de energía por debajo de 10 GeV.

Como resultado, la actividad solar modula la llegada a la Tierra de los rayos cósmicos en ese rango de energías. En particular, observamos que dicha actividad es proporcional al número de *manchas* que aparecen en la superficie del Sol, un fenómeno de origen magnético ya documentado por astrónomos chinos en el año 364 a.C. Las manchas solares aparecen regularmente, con una periodicidad de 11 años, y se observa que su número está *anticorrelacionado* con el flujo total de rayos cósmicos medidos en la Tierra (figura 7).

Podemos por tanto concluir que los rayos cósmicos son extra-terrestres y extrasolares, y que su estudio ofrecerá información sobre nuestra vecindad más lejana: nuestra galaxia y más allá.



CÓMO AFECTAN LOS RAYOS CÓSMICOS A LOS ASTRONAUTAS

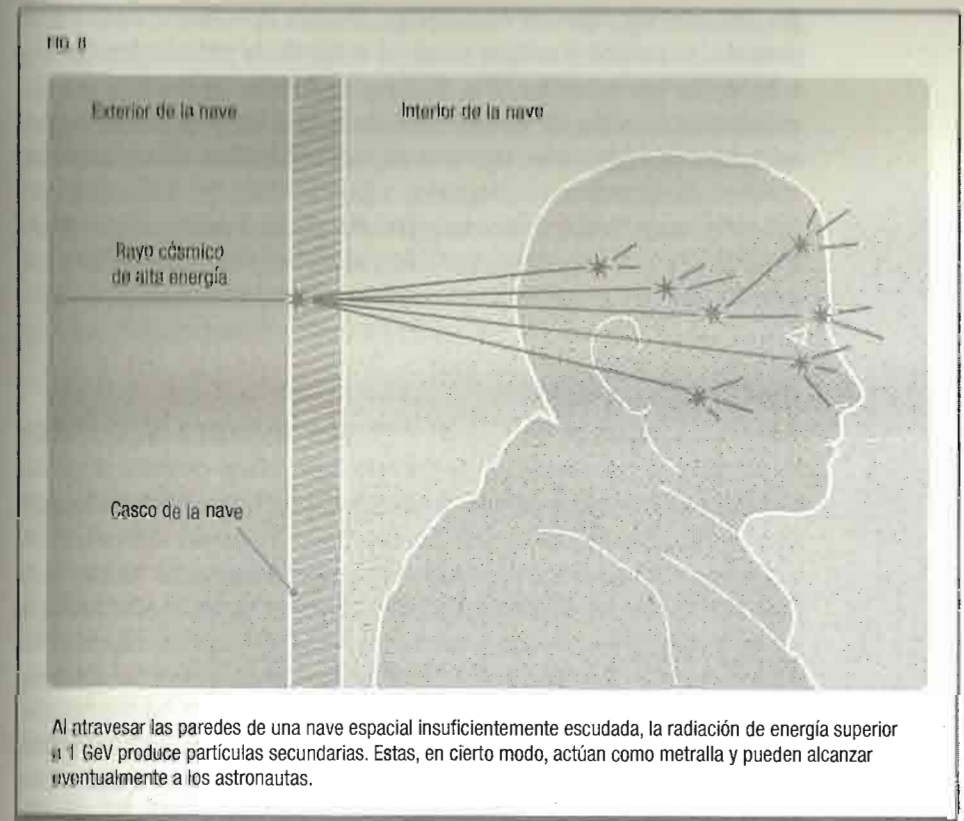
Al abandonar la protección de la atmósfera, los astronautas se encuentran en un medio totalmente ajeno al que nos ha permitido evolucionar durante millones de años hasta llegar a ser lo que somos. Sabemos que las consecuencias para su salud de un viaje a la Luna o de una estancia de varios meses en la EEI no son dramáticas, puesto que esos viajes se han realizado y los astrona-

tas han regresado en buen estado físico y mental. Sin embargo, todavía no sabemos exactamente cómo se verían afectados por los rayos cósmicos de alta energía tras, por ejemplo, un viaje de tres años a Marte. Durante una misión de seis meses en la EEI los astronautas se exponen a una dosis de radiación cuatro veces superior al límite anual establecido por las agencias internacionales, mientras que durante los seis meses de un viaje de ida a Marte la dosis sería veinte veces superior a esa cantidad máxima.

La radiación a la que se exponen sin la protección de la atmósfera, sin embargo, es distinta de la que podemos encontrar en la Tierra. Se trata de una cuestión de energía, mucho más alta en los rayos cósmicos que en la radiación producida en un reactor nuclear. Las paredes de aluminio en el casco de la EEI ofrecen una protección eficaz contra la mayor parte de las partículas procedentes del Sol, pero no frente a los protones y núcleos atómicos con energía cinética por encima de 1 GeV. Al chocar con las paredes de la estación esas partículas tienden a fragmentarse, y gran parte de la radiación secundaria que producen penetra en el interior de ella (figura 8). No obstante, una mayor energía no significa necesariamente un mayor daño biológico, puesto que un protón de varios GeV atraviesa el cuerpo del astronauta dejando un rastro de ionización menor que los diez veces menos energéticos.

Un fenómeno ciertamente inquietante causado por los rayos cósmicos es el de los fosfenos: la visión de luz sin que de hecho esta haya entrado en el ojo del individuo. Desde el programa Apolo los astronautas mencionan que cuando adaptan sus ojos a la oscuridad perciben *flashes* de luz, puntitos y nubes, con una frecuencia aproximada de uno cada tres minutos. El fenómeno no desaparece al cerrar los ojos, por lo que puede interferir con su sueño. No se ha determinado todavía si se debe a pequeñas cascadas de luz producidas cuando el rayo cósmico atraviesa el humor vítreo, o a la estimulación directa que el rayo cósmico pueda hacer del nervio óptico, o incluso a su interacción directa con los centros de visión en el cerebro.

Aunque la única patología observada hasta ahora en los astronautas es un mayor riesgo de sufrir cataratas, la exposición pro-



Al atravesar las paredes de una nave espacial insuficientemente escudada, la radiación de energía superior a 1 GeV produce partículas secundarias. Estas, en cierto modo, actúan como metralla y pueden alcanzar eventualmente a los astronautas.

longada a la radiación ionizante tiene siempre consecuencias: daña al ADN, produce moléculas reactivas y puede matar a la célula. Los científicos pioneros de la radiactividad a principios del siglo xx experimentaron quemaduras, calvicies repentinas, y enfermedades varias; Marie Curie murió de anemia aplásica causada por su exposición a la radiación. Curiosamente, se patentaron medicinas con sustancias radiactivas para tratamientos con lavativas o bebidas tonificantes con radio, pero fueron retiradas del mercado tras la muerte de algunos entusiastas de esa nueva medicina.

Se estima que en torno al 10% de las células cerebrales de un astronauta serían atravesadas por un núcleo atómico pesa-

do durante un viaje de tres años a Marte. Por tanto, vivir en el espacio requerirá resolver antes el tema de la protección frente a la radiación cósmica. Sin dicha protección es posible que la esperanza de vida se viese reducida a una tercera parte, o que solo aquellas personas con una capacidad innata de reparar los efectos de la radiación llegasen a la edad adulta. Colonizar un entorno muy distinto del nuestro sin duda implicará cambios biológicos, lo que podría explicar que en las películas de ciencia ficción aparezcan individuos con las orejas puntiagudas.

CASCADAS ATMOSFÉRICAS

La radiación primaria que llega a la atmósfera es muy distinta de la que observamos cerca de la superficie terrestre, por lo que su estudio requiere o bien la realización de experimentos en el espacio, o bien conocer la relación que existe entre ambas. La primera opción se ve limitada por la frecuencia tan reducida (en torno a 1 partícula por metro cuadrado y año) de los rayos cósmicos de energía superior a 10^6 GeV: puesto que los detectores típicos en satélites y globos aerostáticos cubren una superficie inferior a 10 m^2 , no alcanzarían suficiente estadística en un tiempo razonable. Esos rayos cósmicos deben por tanto observarse desde el suelo usando detectores mucho más extensos. El objetivo genérico hasta el final de este capítulo será entender cómo los rayos cósmicos se propagan a través de la atmósfera y mostrar que la energía y la naturaleza del primario pueden deducirse a partir de las partículas secundarias que este produce.

La alta energía de los rayos cósmicos hace que en sus colisiones con el aire pueda crearse cualquier partícula, incluso las más pesadas, como el bosón de Higgs o el quark top. Ese tipo de sucesos *duros*, sin embargo, son muy poco frecuentes si los comparamos con los sucesos *blandos* donde solo se producen partículas ligeras. Además, las partículas muy masivas tienen vidas medias extremadamente breves, y sus productos de desintegración tienden a confundirse con el resto de partículas presentes en la cascada. Aun así, los rayos cósmicos proporcionan valiosa

información sobre la física muy masiva. Por ejemplo, cuando el colisionador LHC del CERN inició la exploración de una nueva escala de energía sabíamos que no se iba a producir un agujero negro microscópico capaz de engullir la Tierra ni ningún otro proceso físico peligroso. La razón es que colisiones protón-protón como las del LHC están ya ocurriendo continuamente cuando los rayos cósmicos ultraenergéticos entran en la atmósfera o cuando golpean la superficie de la Luna. El hecho de que la Luna siga ahí garantiza que en los aceleradores de alta energía no nos acecha ningún peligro desconocido.

PARTÍCULAS E INTERACCIONES

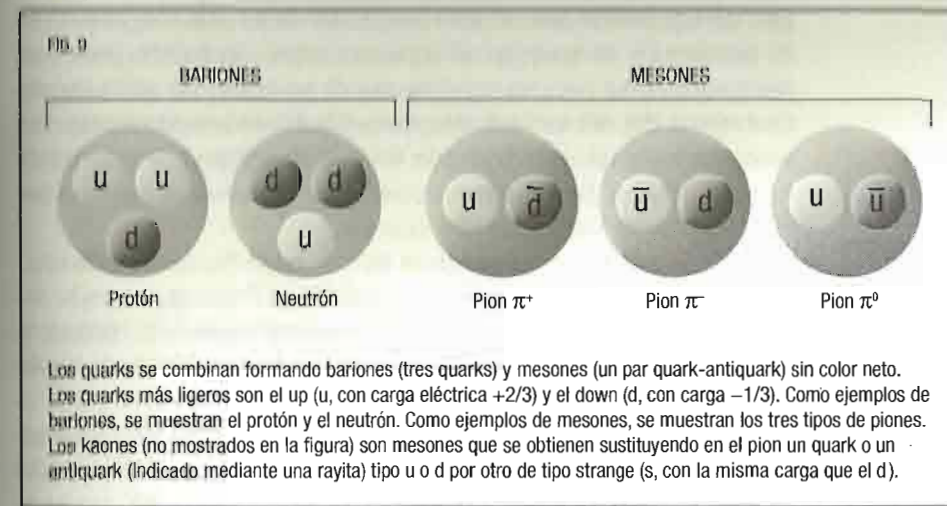
Para entender qué tipo de procesos microscópicos determinan el desarrollo de una cascada atmosférica es conveniente, en primer lugar, caracterizar a la partícula primaria que la inicia (un protón o un núcleo atómico) y a las partículas secundarias que se forman en sus colisiones con el aire. A diferencia del electrón o el fotón, el protón deja de ser una partícula elemental a distancias suficientemente cortas, en el sentido de que le observamos un tamaño y una estructura interna. El radio del protón está en torno a 1 fm (1 fermi o femtómetro son 10^{-16} m) y su masa es de $1,6 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$. Para hacernos una idea de lo que representan estos valores, podemos *escalar* dicho radio por un factor diez mil sucesivas veces: obtenemos el tamaño aproximado de un átomo (10^{-11} m), de un virus (10^{-7} m), de un grano de arena (10^{-3} m), de un árbol (10 m), de una isla como Chipre (10^5 m), y de una estrella como el Sol (10^9 m). Es decir, un protón es a un grano de arena lo que este último es al Sol.

La fuerza que mantiene unidos a los constituyentes de un protón es la llamada interacción *fuerte*, y las partículas con carga fuerte o *color* que la experimentan se denominan *quarks*. Pues bien, el protón está formado por tres quarks ligados que se combinan para formar un objeto sin color neto (el protón es *blanco*). La atracción mutua que experimentan los quarks en el interior de un protón es mucho más intensa que la fuerza

electromagnética que se da entre el núcleo y los electrones de un átomo, lo que explicaría que su tamaño sea diez mil veces menor. El mediador de la interacción entre quarks es el *gluon*, de modo análogo a como la fuerza electromagnética entre dos partículas cargadas está mediada por el fotón. Una diferencia fundamental entre gluones y fotones es que los primeros aparecen en ocho colores distintos, mientras que solo hay un tipo de fotón. Como consecuencia, la energía potencial de la interacción fuerte entre dos quarks crece mucho más deprisa con la distancia que la electromagnética. Tanto es así que separar a distancias mayores de 1 fm un quark de los otros dos en el interior de un protón requiere más energía que la necesaria para crear un par quark-antiquark. Al intentar separar ese quark se realiza un trabajo sobre el sistema, se le da una energía, y el sistema la usa para crear el par y ceder el antiquark al quark que estamos arrancando. Es decir, el sistema encuentra energéticamente más favorable crear un antiquark y cedérselo al quark que dejar que este último escape solo. Los quarks no se encuentran nunca aislados, sino que aparecen confinados formando objetos sin color neto: los hadrones.

Los hadrones pueden ser de dos tipos: *bariones* formados por tres quarks y *mesones*, que incluyen un quark y un antiquark; el protón y el neutrón son ejemplos de bariones, mientras que piones y kaones son los mesones más ligeros. En la figura 9 se dan ejemplos de algunas de estas partículas en términos de sus quarks constituyentes.

Respecto a los núcleos atómicos, están formados por protones y neutrones ligados por interacciones fuertes *residuales*, que son suficientes para contrarrestar la repulsión eléctrica que, al ser partículas con la misma carga, experimentan los protones. El alcance de estas interacciones fuertes, sin embargo, es relativamente corto, y a distancias por encima de 10 fm se ven superadas por dicha repulsión. Es decir, debido a que el color de los quarks se encuentra siempre confinado en hadrones sin color neto, a distancias grandes la interacción fuerte es marginal frente a la electromagnética. La suma del número de protones y neutrones en un núcleo atómico se denomina número másico A .



DESARROLLO DE LAS CASCADAS

Otro aspecto fundamental que debemos entender es la magnitud de la energía con la que los rayos cósmicos primarios llegan a la Tierra. Un rayo cósmico de 10^6 GeV tiene una energía cinética similar a la de una mosca doméstica volando a 3 m/s. La diferencia esencial entre ambos objetos es que mientras toda la energía del rayo cósmico está contenida en un solo protón, en la mosca es compartida por los aproximadamente 10^{22} protones y neutrones que la forman. Si cada uno de esos protones y neutrones tuviese una energía de 10^6 GeV, entonces la mosca transportaría unos 10^{18} julios: si cayese en el lago de Ginebra su energía sería suficiente para calentar los 89 km^3 de agua y aumentar la temperatura del lago en 4°C . El rayo cósmico es como una de esas moscas en miniatura, lo que hace que sus colisiones con el aire resulten interesantes.

Consideremos por tanto un rayo cósmico primario de tipo protón y energía en torno a 10^6 GeV. Al entrar en la atmósfera recorrerá lo que se conoce como una *longitud de interacción hadrónica* (unos 90 g/cm^2) y chocará a una altura en torno a 20 km

con un núcleo de aire. Como resultado de la colisión, el protón se romperá y su energía se repartirá entre un barión principal (un protón o un neutrón) y decenas de mesones de alta energía. Los restos del núcleo atómico con el que ha chocado toman tan solo una insignificante fracción de energía del protón primario y son absorbidos por el aire circundante. Sigamos el rastro a los hadrones secundarios de alta energía.

El barión principal proseguirá su recorrido hacia el suelo chocando con el aire repetidamente y perdiendo energía en cada colisión. En promedio experimentará once colisiones si el primario penetró en la atmósfera verticalmente, o el doble si lo hizo desde un ángulo cenital de 60°.

Entre los mesones secundarios, debemos distinguir entre los piones cargados más los kaones de cualquier tipo y los piones neutros.

Los piones cargados y los kaones son inestables pero su vida media es relativamente larga, por lo que tras ser creados podrán decaer o chocar con un átomo de aire. El que se dé uno u otro proceso dependerá en gran medida de su energía: los más energéticos experimentan una mayor dilatación relativista de su vida media, lo que disminuye la probabilidad de que se desintegren antes de chocar. En particular, si la energía de un pion cargado es mayor que 30 GeV entonces será más probable un choque del que resultarán otros piones de menor energía. Por otro lado, los piones cargados de energía por debajo de 30 GeV tienen mayor tendencia a decaer, dando un muon y un neutrino:

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \quad \pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu.$$

La barra en la expresión anterior indica que se trata de un antineutrino; a menudo nos referiremos genéricamente a la partícula y la antipartícula de cualquier especie con el nombre de la primera: muones para μ^- y μ^+ , etc. Los muones y los neutrinos son partículas sin interacciones fuertes (leptones), que aparecen en la atmósfera a través de la desintegración de piones y kaones secundarios. Los muones tienen la misma carga eléctrica que el

electrón pero son unas 200 veces más masivos. Son inestables, con una vida media relativamente larga: cuando su energía es de 5 GeV su longitud de desintegración es de 31 km, suficiente para alcanzar el suelo desde cualquier inclinación. El modo más frecuente de desintegración es

$$\mu^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu \quad \mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu.$$

Debido a su masa y a la ausencia de interacciones fuertes, los muones son extremadamente penetrantes; al propagarse ionizan el aire y solo pierden unos 2 MeV por centímetro de agua (o 10 m de aire) recorrido. Un muon de 1000 GeV puede atravesar varios kilómetros de hielo o agua antes de reducir su velocidad y desintegrarse. En la atmósfera el número de muones aumenta con la profundidad, siendo el tipo de radiación cósmica más abundante en la superficie terrestre. Los neutrinos, una vez producidos, no dejan rastro en la atmósfera.

Los piones neutros, por su parte, tienen una vida media 1000 veces más corta que los cargados debido a que pueden decaer en dos fotones:

$$\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma.$$

Los π^0 se desintegran casi instantáneamente y generan la *componente electromagnética* dentro de la cascada hadrónica iniciada por el protón. Una vez producidos, los fotones de alta energía interactúan con núcleos atmosféricos y se convierten en pares electrón-positrón (e^+e^-), tal como se muestra en la figura 10. Cada electrón, a su vez, también colisionará con el aire, creando un fotón de similar energía en un proceso que se denomina emisión de radiación de frenado o *bremssstrahlung* (figura 11). Ambas colisiones son electromagnéticas: están mediadas por fotones y ocurren con una frecuencia similar. En particular, fotones y electrones experimentarán una colisión de este tipo tras atravesar unos 36 g/cm², profundidad que se

COLISIONES HADRÓNICAS

En una colisión entre dos hadrones o entre un hadrón y un núcleo atómico pueden darse interacciones quark-quark de corta distancia o interacciones hadrón-hadrón de más larga distancia dependiendo de cual sea el *parámetro de impacto* (distancia transversal) en el proceso. En las primeras (figura 1) la interacción entre los quarks del proyectil y del blanco está mediada por gluones, mientras que en las segundas —que podríamos llamar colisiones *periféricas*—, dado que la colisión involucra partículas sin color, la interacción fuerte es residual y debe entenderse como mediada no por gluones sino por objetos compuestos también sin color neto, como los *pomerones* (figura 2). El pomerón, nombrado así en honor del físico soviético Leonid Pomeranchuk, no es exactamente una partícula, sino una familia de partículas de masa y espín creciente que definen algo que se conoce como *trayectoria de Regge*. Las trayectorias de Regge, ideadas por Tullio Regge en 1961, podrían asimilarse a los modos de vibración de una cuerda. Esta interpretación de las interacciones hadrónicas en términos del intercambio de cuerdas fue realizada por el italiano Gabriele Veneziano en 1968, y resultó ser el germen que dio lugar a la actual teoría de cuerdas. Curiosamente, aunque las cuerdas primitivas de Veneziano no ofrecen una descripción satisfactoria de las interacciones hadrónicas a distancias cortas (donde se precisa de los gluones), cuerdas millones de veces más cortas fueron usadas pocos años más tarde para definir una teoría unificada consistente de la gravedad y las partículas elementales.

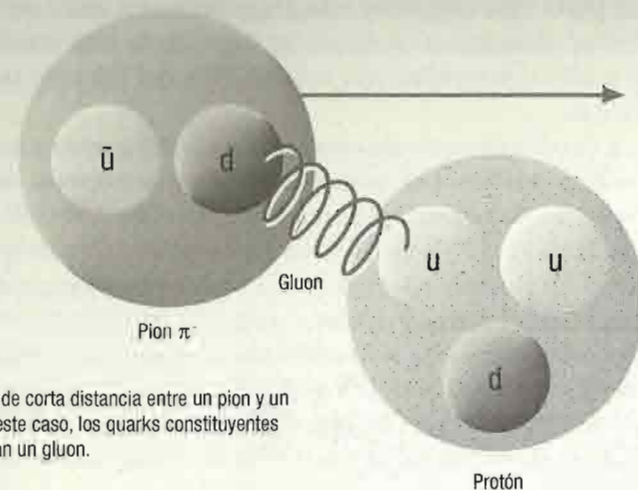
Colisiones centrales y periféricas

Consideremos la colisión de un hadrón ultrarrelativista con un núcleo de aire en reposo. Cuando la colisión es periférica (figura 2), el intercambio de una pequeña cantidad de energía con el núcleo lleva al hadrón incidente a un estado virtual *excitado* que decae instantáneamente en varios hadrones secundarios, los cuales se reparten prácticamente toda la energía inicial. Estas colisiones también se conocen como *difractivas*, ya que las partículas finales se encuentran en un cono de direcciones similar al que forma un haz de luz difractado tras pasar por una rendija. Entre las partículas finales encontramos siempre un *hadrón principal* (hadrón secundario más energético) además de piones (π^+ , π^- , π^0) y, en menor medida, kaones y otros hadrones más pesados. La multiplicidad de estados finales en este tipo de colisiones puede variar entre 1 y varias decenas. Cuando la colisión no es periférica sino central (figura 1) da lugar a un proceso con mayor inelasticidad: menor energía retenida por el hadrón principal y una mayor multiplicidad de estados finales. En el choque de un protón con el aire, el barión principal resultante tras la colisión mantiene en promedio el 30% de la energía del protón incidente.

El origen de leptones y fotones atmosféricos

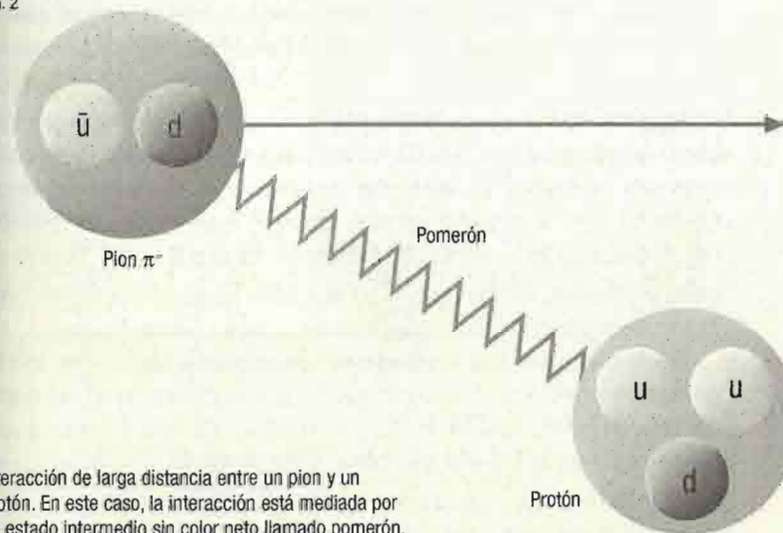
Es una buena aproximación suponer que cuando un hadrón choca con un núcleo de aire solo se producen otros hadrones, ya que la producción directa de leptones (partículas sin interacciones fuertes) y fotones requiere procesos mediados por interacciones electromagnéticas o débiles que son mucho menos frecuentes. Los leptones y fotones atmosféricos tienen su origen en la desintegración de algunos de los hadrones secundarios producidos en las colisiones.

FIG. 1



Interacción de corta distancia entre un pión y un protón. En este caso, los quarks constituyentes intercambian un gluón.

FIG. 2



Interacción de larga distancia entre un pión y un protón. En este caso, la interacción está mediada por un estado intermedio sin color neto llamado pomerón.

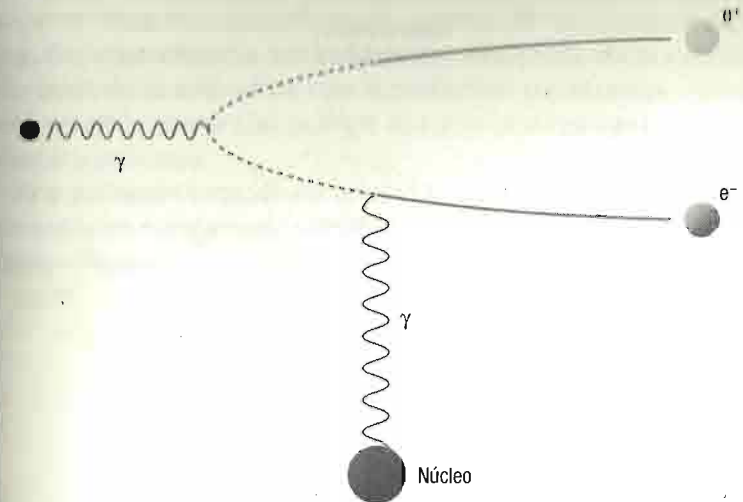
denomina *longitud de radiación*. Estas partículas constituyen la parte blanda de la radiación cósmica, ya que son menos penetrantes que los muones. Aunque electrones y positrones son las partículas cargadas más abundantes en una cascada atmosférica, alcanzan su máximo número en la alta atmósfera, y en el suelo representan tan solo el 20 % del número total de partículas.

La radiación que observamos cerca del suelo es la superposición de muchas cascadas simultáneas, la mayoría de ellas procedentes de primarios de energía entre 10 y 100 GeV. El aire absorbe más del 95% de esa energía cósmica antes de que llegue al suelo. El máximo número de partículas cargadas, predominantemente electrones, se obtiene a alturas de unos 10 km, mientras que en el suelo cerca del 80% de las partículas son muones de energía en torno a 1 GeV y el 20% son electrones y positrones menos energéticos, con una fracción inferior al 1% de hadrones. El flujo aproximado de muones al nivel del mar es de 1 por cm^2 y minuto.

Sobre el fondo continuo producido por los rayos cósmicos menos energéticos, en el suelo también detectamos cascadas individuales extensas que son generadas por rayos cósmicos de energía por encima de 1 TeV (teraelectronvoltios) = 1 000 GeV. La distribución de partículas en esos sucesos de muy alta energía es ligeramente distinta a la distribución promedio. En particular, el número máximo de partículas cargadas en la cascada se obtiene a una profundidad atmosférica $X_{\text{máx}}$ más o menos grande dependiendo de la energía del primario, llegando a $X_{\text{máx}} = 800 \text{ g/cm}^2$ para primarios de 10^{11} GeV. En la figura 12 representamos esquemáticamente el desarrollo de una cascada atmosférica.

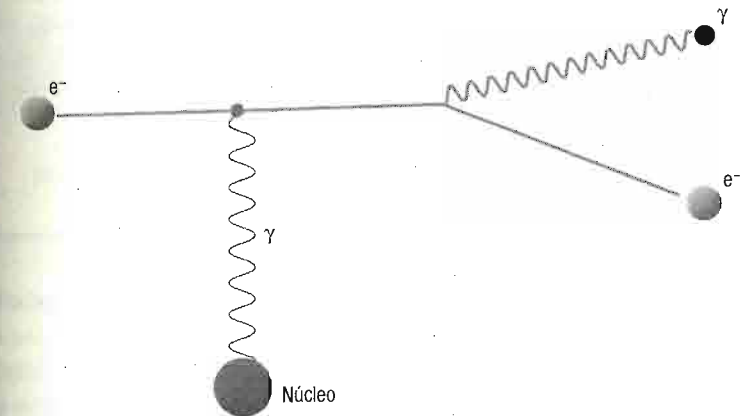
En estas cascadas extensas, la energía del rayo cósmico primario puede deducirse a partir del número total de partículas que observamos en el aire o en el suelo. En cuanto a su número másico A , puede también deducirse de la mayor o menor profundidad a la que se encuentre el máximo $X_{\text{máx}}$ de la cascada. Por ejemplo, hemos mencionado que la cascada típica producida por un protón de 10^{11} GeV tendría su máximo a $X_{\text{máx}} = 800 \text{ g/cm}^2$. Si el primario fuese un núcleo de hierro

FIG. 10



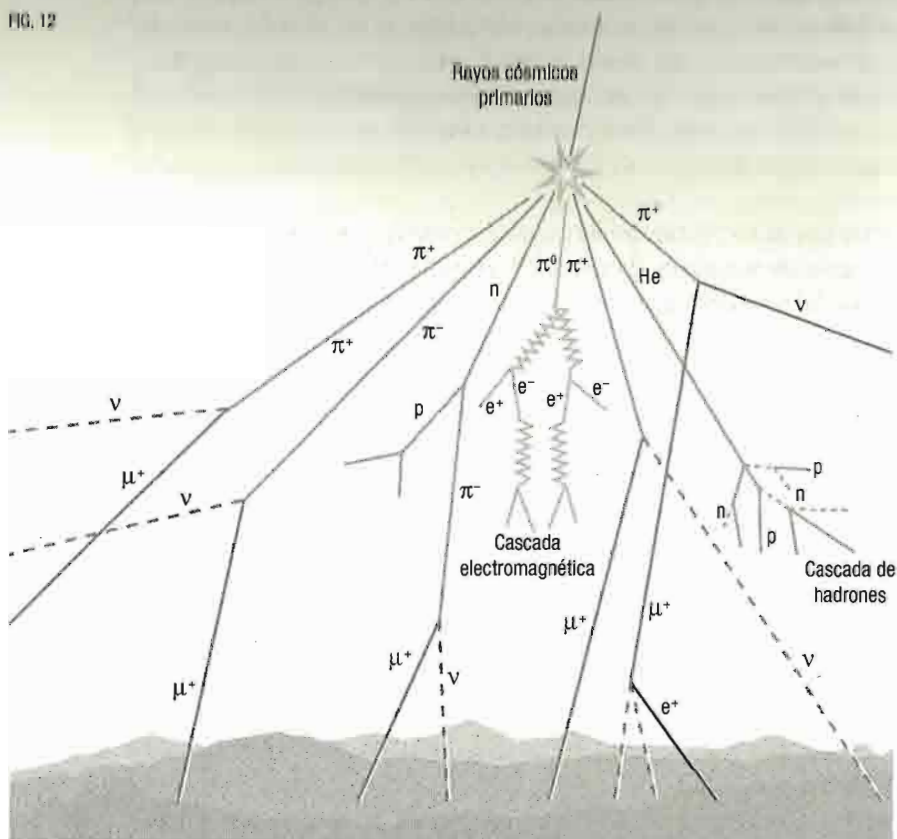
Conversión en par e^+e^- : el fotón emite un par e^+e^- virtual que al interactuar con el campo electromagnético del núcleo se vuelve real.

FIG. 11



Emisión de radiación de frenado (*bremsstrahlung*): el electrón interactúa con el núcleo, se excita y decae en un electrón y un fotón.

FIG. 12



Representación esquemática del desarrollo de una cascada atmosférica. Tras una primera colisión con un núcleo atómico, el rayo cósmico primario, es decir, la partícula que llega a la atmósfera desde el espacio, inicia una cascada con millones de colisiones, creaciones y desintegraciones de partículas.

($A=56$) el punto con el máximo número de partículas estaría más alto en la atmósfera, a $X_{\text{máx}} = 730 \text{ g/cm}^2$. La razón es que el hierro puede entenderse como la suma de 56 protones y neutrones de energía $1,8 \cdot 10^{-9} \text{ GeV}$ cada uno: tras la primera colisión se romperá liberando a sus constituyentes, y la cascada resultante será muy similar a la superposición de las 56 cascadas tipo protón/neutrón correspondientes. Al ser menos energéticas, cada

una de esas cascadas tendrá su máximo a mayor altura en la atmósfera, en concreto, a una profundidad 70 g/cm^2 menor de la que se daría en una cascada tipo protón 56 veces más energética. En consecuencia, un análisis del desarrollo de la cascada a lo largo de la atmósfera y de la radiación que alcanza el suelo será sensible tanto a la energía como a la naturaleza del rayo cósmico primario.

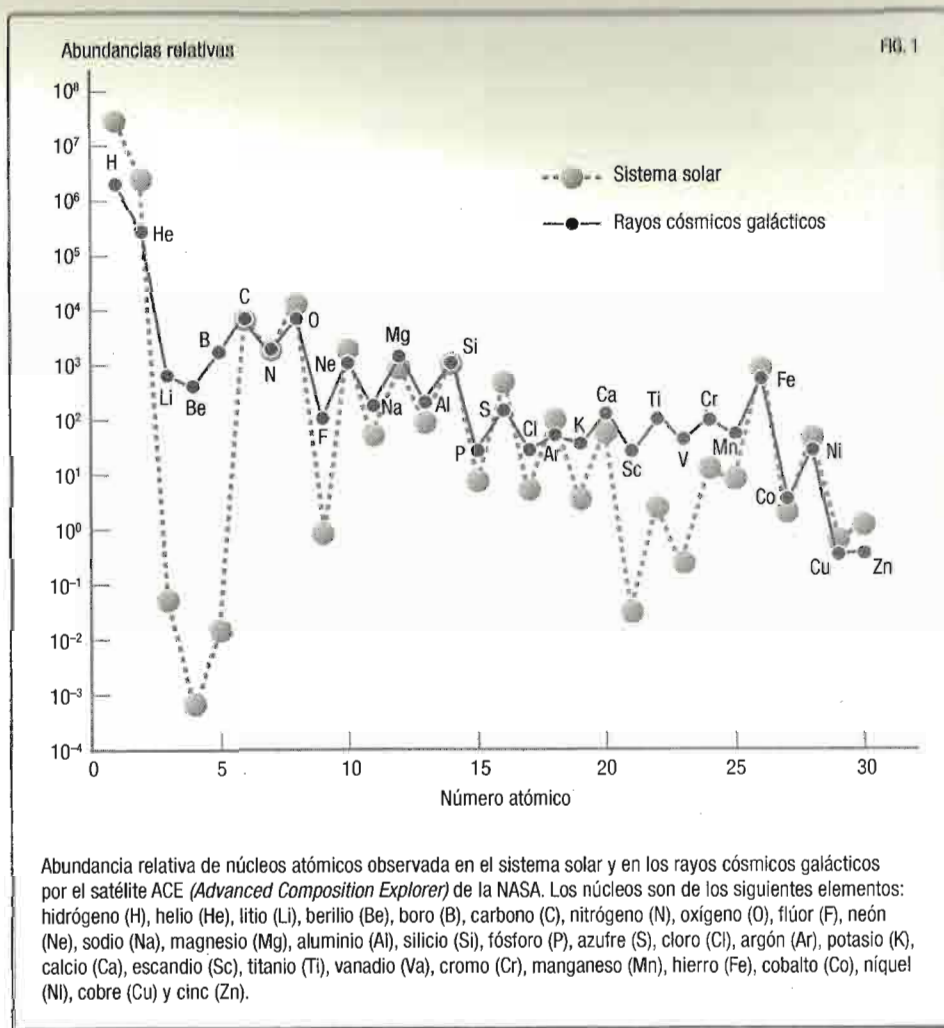
Hoy podemos entender el desarrollo de las cascadas atmosféricas gracias a la física de partículas desarrollada por los grandes físicos del pasado siglo.

Propagación a través del medio interestelar

La composición química de los rayos cósmicos es similar a la de la materia ordinaria, pero con algunas diferencias notables. Esas diferencias y la isotropía con la que llegan a la Tierra pueden usarse para deducir cuánto tiempo han invertido en el viaje desde sus fuentes y qué han encontrado por el camino.

Los rayos cósmicos son núcleos atómicos completamente ionizados, es decir, átomos de materia desprovistos de sus electrones. Observamos que la frecuencia de cada núcleo (la composición de los rayos cósmicos) es muy parecida a la de la materia con la que está hecho el sistema solar, la cual se obtiene analizando meteoritos y la fotosfera del Sol. Por tanto, aunque el origen de los rayos cósmicos no es cercano, están hechos de lo mismo que nosotros. Este hecho queda reflejado en la figura 1, que muestra la abundancia de las distintas especies relativa al silicio. Cada núcleo está caracterizado por su número de protones o *número atómico* (Z). Un núcleo de hidrógeno es un protón, el de helio contiene 2 protones y 2 neutrones, el de litio 3 protones y 4 neutrones, el núcleo de berilio contiene 4 protones y 5 neutrones, etc.

La figura 1 muestra similitudes notables entre ambas composiciones, por ejemplo, un efecto par-impar que favorece a los núcleos de Z impar al estar más fuertemente ligados que aquellos con un número par de protones, o picos de frecuencia en el carbono, el oxígeno y el hierro. No obstante también revela algunas diferencias claras. En primer lugar, la cantidad de hidrógeno relativa a la de núcleos con Z mayor que 1 es sensiblemente menor en



los rayos cósmicos que en el sistema solar. Este hecho se debería a que el hidrógeno es más difícilmente ionizable que los núcleos pesados: aparece con mayor frecuencia ligado a un electrón formando un átomo neutro y por tanto no puede ser acelerado con campos electromagnéticos. Una segunda diferencia, todavía más llamativa, es la frecuencia de los llamados núcleos ligeros (litio,

berilio y boro) relativa a la de los medianos (carbono, nitrógeno y oxígeno): encontramos diez mil veces más núcleos ligeros en los rayos cósmicos que en el sistema solar, donde los núcleos ligeros son muy raros. Aunque menos acusado, un efecto análogo se observa también en la abundancia de núcleos con un Z por debajo del hierro, sobre todo de escandio, titanio y vanadio.

¿Cómo se explican esas diferencias? ¿Hay acaso dos fábricas distintas en el universo, una que hace rayos cósmicos y otra que nos hace a nosotros? Antes de contestar, recordemos brevemente cómo se sintetizan los núcleos que forman la materia visible.

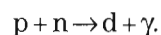
LOS RAYOS CÓSMICOS NO PROCEDEN DEL BIG BANG

Bien, en realidad todo procede del Big Bang, pero con el título que precede nos referimos a que los núcleos atómicos que encontramos en los rayos cósmicos ni fueron sintetizados ni adquirieron su gran energía durante la Gran Explosión con la que se inició el universo del que todo forma parte. Veamos en qué basamos esa afirmación.

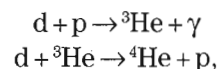
Una primera observación es que para sintetizar un núcleo a partir de otros dos de menor número atómico se necesita cierta cantidad de energía cinética inicial. La razón es que los núcleos deben ser capaces de superar la barrera de repulsión electrostática producida por sus cargas y acercarse lo bastante como para poder experimentar una interacción fuerte (de menor alcance que la electromagnética) que los ligue. Si los núcleos se encuentran formando un gas, la medida de su energía cinética viene expresada por su temperatura. En general, decir que cualquier objeto tiene una temperatura T significa que las partículas que lo forman son capaces de intercambiar energía y que si tomamos una de esas partículas al azar su energía cinética estará en torno a $k_B T$, siendo k_B la constante de Boltzmann, $8,6 \cdot 10^{-5}$ eV/K. Es importante notar que no todas las partículas de un gas a temperatura T tienen la misma energía cinética: si intercambian energía aleatoriamente, tenerlas a todas ellas con una misma energía sería una configuración microscópica muy «improbable»; la con-

figuración más probable viene dada por la llamada *distribución de Maxwell-Boltzmann*, e incluye partículas con energía varias veces mayor que $k_B T$. Dado que al multiplicar la temperatura de un objeto en kelvins por k_B obtenemos la energía típica de las partículas en eV (1 eV son 10^{-6} MeV), es usual referirse a la temperatura en unidades de eV o keV.

Nuestro universo está actualmente en expansión, y extrapolando hacia atrás en el tiempo deducimos que las altas temperaturas requeridas para superar la barrera electrostática y sintetizar núcleos atómicos se dieron durante los primeros instantes tras el Big Bang, hace unos 13800 millones de años. Sin embargo, la dinámica dictada por la expansión impidió entonces la producción de núcleos más allá del hidrógeno y el helio, con pequeñas cantidades de litio y berilio. La razón es fácil de entender. Los núcleos pesados se forman a partir de otros núcleos más ligeros a través de una cadena de procesos cuyo primer paso es siempre la fusión de un protón y un neutrón para formar un deuterón:



En el baño térmico donde ocurre esta reacción encontraremos también gran cantidad de fotones, y cuando la temperatura es superior a unos 90 keV estos tienden a romper al deuterón antes de que pueda reaccionar para formar núcleos de helio. Por tanto, en el universo primitivo la cadena de producción de núcleos pesados estuvo rota en su primer eslabón hasta que la expansión enfrió la temperatura ambiente por debajo de 90 keV, lo que sucedió unos 3 minutos después del instante inicial. Por debajo de esa temperatura los procesos de síntesis del helio,



ocurren de manera rápida, y en el universo temprano esas reacciones consumieron todos los neutrones presentes (1 por cada

6 protones) en unos pocos minutos. El problema con el resto de núcleos es que, debido a que se obtienen mediante la fusión de núcleos con cada vez mayor carga y repulsión electrostática, genéricamente requieren una temperatura más alta para formarse. A los 15 minutos tras el instante inicial la temperatura del universo ya había bajado a 30 keV, e incluso la síntesis de litio y berilio quedó interrumpida.

Como vemos, aunque durante el Big Bang ocurrieron muchas cosas muy deprisa, algunas otras también importantes ocurrieron bastante más tarde, en particular, la síntesis de los núcleos atómicos con los que estamos hechos nosotros y los rayos cósmicos. Al respecto circula una anécdota sobre Steven Weinberg, premio Nobel de Física en 1979 y autor de un libro de divulgación sobre el Big Bang titulado *Los tres primeros minutos*. Durante una presentación un colega físico en la audiencia le preguntó por qué había titulado su libro así y no «Los tres primeros segundos», ya que todo lo realmente relevante terminaba cuando se establece una relación de 6 a 1 entre protones y neutrones, siendo el resto aritmética elemental. Weinberg le contestó que la razón era que «esperaba que muchos lectores lo compraran pensando que era un libro de temática sexual, y todos sabemos que nada interesante puede ocurrir en solo tres segundos». La versión de su libro en español, mucho menos vendida que la inglesa, añade «del universo» al título original.

VIENEN (Y VENIMOS) DE LAS ESTRELLAS

En ellas se dan temperaturas también muy altas, y la secuencia que siguen de menor a mayor temperatura, contraria a la del universo durante el Big Bang, es la clave que permite entender cómo aparecen los núcleos más pesados que el helio.

En una estrella se dan dos procesos físicos que durante un largo periodo de tiempo se mantienen en equilibrio: por un lado la gravedad atrae hacia su centro a los núcleos que la forman, inicialmente hidrógeno y helio en la proporción de 1 a 3 que resulta del Big Bang; por otro lado los procesos termonucleares en

su interior liberan energía y calientan a esos núcleos, lo que les permite mantener una presión contra las capas externas de la estrella y evitar que esta colapse. El ritmo de producción de energía compensa la gran cantidad de energía en forma de luz y de neutrinos que la estrella emite, de modo que su temperatura se mantiene constante.

Un hecho absolutamente remarcable que se da en las estrellas es su estabilidad térmica. Genéricamente ello se debe a su *capacidad calorífica* negativa: al perder energía en forma de luz, la temperatura de las estrellas tiende a aumentar. ¡En lugar de enfriarlas, la emisión de calor las calienta! Veamos cómo es eso posible.

En una estrella las capas externas tienden a caer hacia el centro, pero se ven frenadas por la presión que ejercen las partículas en las capas más internas. Esa presión es mayor cuanto mayor sea la energía cinética de las partículas en la estrella, es decir, cuanto más alta sea su temperatura. La estrella genera continuamente energía a través de reacciones de fusión nuclear. Si en un momento dado se produce algún proceso explosivo que libera una gran cantidad de energía en su interior, la estrella inicialmente se calentará, incrementando la presión sobre las capas externas y aumentando algo su tamaño. Esa expansión hará que en promedio las partículas se alejen del centro, que «suban» y pierdan algo de energía cinética, de velocidad, del mismo modo que una piedra lanzada hacia arriba se mueve cada vez con menor velocidad. Es decir, la expansión de la estrella hace que disminuya su temperatura y se compense el incremento inicial.

Es importante entender la analogía con la piedra descrita en el párrafo anterior. Al lanzarla con fuerza hacia arriba su energía cinética inicial es muy grande, pero conforme sube y se separa ligeramente del centro de la Tierra esa energía va reduciéndose, hasta llegar a ser nula en el punto de altura máxima. Del mismo modo, la expansión de la estrella «roba» energía cinética, temperatura, a las partículas que la forman.

La oscilación en la temperatura también puede producirse en la dirección contraria, por ejemplo, cuando el combustible nuclear empieza a escasear. La emisión de energía luminosa no se compensa entonces con la energía producida en el interior de la

estrella y su temperatura empezará a reducirse. Al disminuir la energía cinética de las partículas en su interior y la presión que estas ejercen sobre las capas externas, la estrella se contrae, y esa «caída» de materia hacia el centro durante la contracción se traduce en un aumento de la velocidad y de la energía cinética de las partículas, lo que incrementa la temperatura de la estrella. El resultado neto será una estrella ligeramente más pequeña pero más caliente que al principio, y de ahí el signo negativo en la capacidad calorífica de los sistemas ligados por fuerzas gravitatorias: al perder energía por la emisión de luz transforman parte de su energía gravitatoria en energía cinética e incrementan su temperatura. Aunque las estrellas producen su energía en reacciones nucleares, disponen también de tanta energía gravitatoria como precisen sin pagar más precio que una contracción en su tamaño. Como norma general durante la vida de una estrella, cuanto más vieja sea esta, más pequeña y caliente será.

Durante una primera etapa las estrellas sintetizan helio a partir de hidrógeno a una temperatura en torno a 1 keV (15 millones de grados Celsius). Nuestro Sol se encuentra en esta fase desde hace 4600 millones de años, y continuará en ella durante 5000 millones de años más. Cuando el hidrógeno se agota en el núcleo central de la estrella este se contrae, el hidrógeno en las capas más externas «cae» hacia el centro, gana energía cinética y alcanza la temperatura de combustión que antes solo se daba en el núcleo. Esta nueva combustión masiva transforma a la estrella en una gigante roja de gran luminosidad, con un núcleo de helio calentándose por efecto de su propia gravedad y la capa más externa expandiéndose y enfriándose. Si la estrella es suficientemente masiva su núcleo alcanzará la temperatura de combustión del helio, en torno a 10 keV. La estructura de la estrella consiste entonces en un núcleo central donde el helio se fusiona para formar núcleos medianos (carbono, nitrógeno y oxígeno) y otra zona más fría donde continúa la combustión de hidrógeno para formar helio. Los núcleos ligeros (litio, berilio y boro) aparecen

Hay más cosas en el cielo
y la tierra, Horacio, que las
que sospecha tu filosofía.

WILLIAM SHAKESPEARE EN *HAMLET*

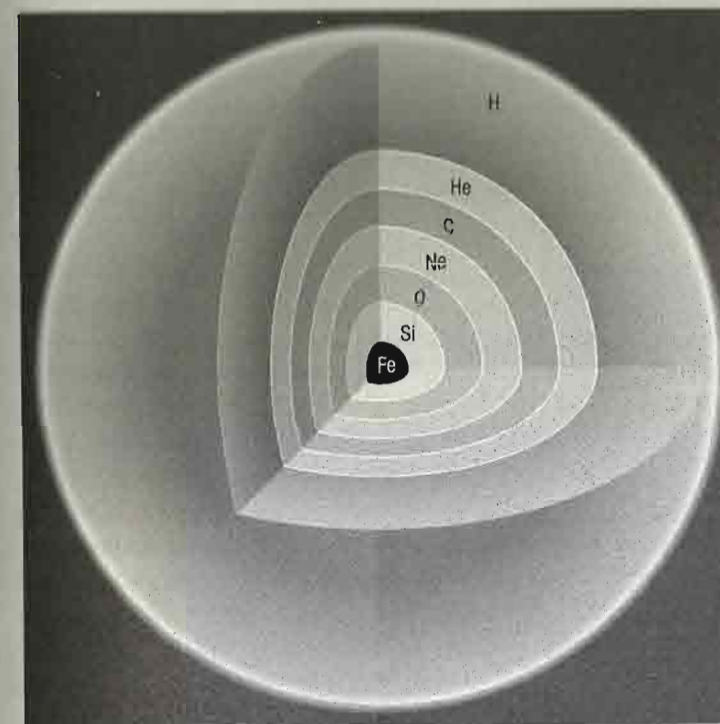
solo como intermediarios en la formación de los medianos, por lo que son consumidos rápidamente hasta casi desaparecer. Esta es la razón básica por la que los elementos ligeros son tan raros en el sistema solar: desaparecen al ser usados por las estrellas para sintetizar carbono, nitrógeno y oxígeno.

Si la estrella tiene una masa superior a 8 masas solares, una vez no quede helio en el núcleo central se producirá una nueva contracción que incrementará su temperatura hasta unos 100 keV, a la que el carbono entra en combustión para formar núcleos pesados hasta el hierro y el níquel. La estructura de la estrella incluye entonces varias capas a diferentes temperaturas, tal como se ilustra en la figura 2.

La fase final es la de *supernova*, la cual ocurre cuando se agota el combustible que sintetiza hierro y que mantiene la presión en el núcleo de la estrella. Este núcleo central, de unos 3000 km de radio, se vuelve entonces inestable: tras ganar temperatura los electrones presentes en el medio comienzan a disociar núcleos atómicos (proceso que absorbe energía cinética) y a transformarse junto a un protón en un neutrón y un neutrino ($pe \rightarrow nv$), el cual es capaz de escapar y reducir aún más la presión en el núcleo de la estrella. Debido a su inmensa gravedad, el núcleo se colapsa, «implosiona», y en aproximadamente una décima de segundo cae de modo supersónico hasta encontrar un centro «duro» formado por neutrones que no puede contraerse más. En su caída los núcleos pesados ganan energía cinética, la cual «rebota» en el centro y forma una *onda de choque* hacia fuera capaz de arrastrar las capas externas de la estrella. Durante unos 20 segundos la temperatura y la densidad en el corazón de la estrella son inmensas, del orden de 30 MeV y 10^{12} g/cm³, respectivamente. Los protones en ese corazón reaccionan con los electrones dando neutrones y neutrinos, que son capaces de escapar y calentar la región por detrás de la onda de choque. Es en esa región donde se sintetizan los núcleos atómicos más allá del hierro, como la plata, el oro o el uranio. Cualquier núcleo de oro ha nacido en este tipo de explosiones de supernova.

El resultado neto de la explosión es una inmensa cantidad de neutrinos (99% de toda la energía emitida), una gran lumi-

FIG. 2



Estructura en «capas de cebolla» de una estrella muy masiva capaz de sintetizar núcleos de hierro. Desde el centro hacia el exterior: hierro (Fe), silicio (Si), oxígeno (O), neón (Ne), carbono (C), helio (He), hidrógeno (H).

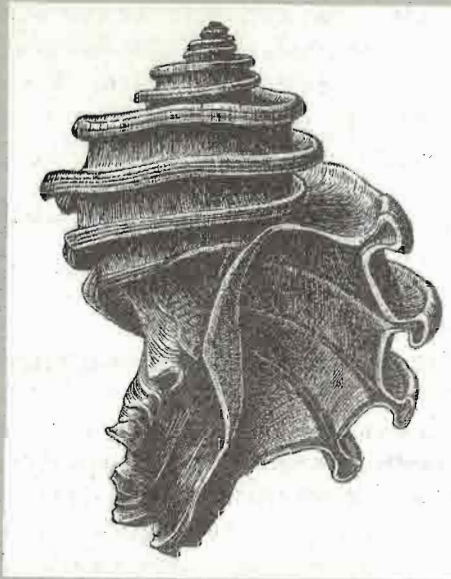
nosidad (durante unas semanas, mayor que la de toda la galaxia donde ocurre la explosión) y una gran cantidad de núcleos de todo tipo que es expulsada al espacio. El *remanente de supernova* formado por la onda de choque tiene una gigantesca energía cinética: núcleos y electrones con una masa total equivalente a diez masas solares que se propagan por el espacio interestelar durante periodos del orden del millar de años a una velocidad en torno a 3000 km/s, arrastrando a su paso a los núcleos y moléculas que encuentran. Por tanto, el material sintetizado en la estre-

EFFECTOS BIOLÓGICOS DE UNA SUPÉRNOVA CERCANA A LA TIERRA

Si una explosión de supernova ocurriera a una distancia inferior a 50 pc (1 pársec es equivalente a 3,26 años-luz), el gas con núcleos atómicos de todo tipo emitido en la explosión podría superar las defensas que nos brinda la heliosfera y alcanzar la Tierra. En realidad ese no es un tema que a día de hoy deba preocuparnos en exceso, puesto que la «bomba» más cercana de ese tipo, la supergigante roja Antares, se encuentra en la constelación de Escorpio a unos 170 pc de nosotros. Sin embargo, si miramos al pasado debemos tener en cuenta que la galaxia no es un sistema estático, y que las distancias entre estrellas cambian en una escala temporal típica de un millón de años.

El origen de la extinción del Plioceno-Pleistoceno

En un artículo publicado en 2002, el astrofísico español Narciso Benítez y sus colaboradores argumentan que hace alrededor de 2 millones de años la asociación estelar de Escorpio-Centauro pudo encontrarse mucho más cerca de la Tierra que en la actualidad. Escorpio-Centauro define el centro de una gigantesca burbuja de baja densidad y alta temperatura que incluye al sistema solar y que se habría formado tras la explosión de unas 20 supernovas durante los últimos 11 millones de años. Un equipo alemán dirigido por Klaus Knie había detectado en 1999 la presencia de un isótopo inusual del hierro, el ^{60}Fe , en muestras de suelo de edad similar tomadas en el fondo del océano. Dado que el ^{60}Fe es sintetizado en esas explosiones y que su vida media es de 3,7 millones de años, las supernovas señaladas por Benítez parecen una explicación convincente. Su hipótesis también explicaría la llamada extinción marina del Plioceno-Pleistoceno, que podría haber sido causada por la llegada de gran cantidad de luz ultravioleta a la superficie terrestre. Dicha luz es capaz de reducir significativamente la cantidad de plancton en los océanos, lo que habría desencadenado una extinción de moluscos. La luz ultravioleta causante de tal desastre ecológico no procedía directamente de la supernova, sino del Sol: el intenso viento de partículas cargadas asociado a la supernova redujo la capa de ozono en la alta atmósfera, permitiendo que la radiación ultravioleta solar alcanzase la superficie terrestre.



Ecphora gardnerae, uno de los moluscos extinguidos al final del Plioceno. El dibujo es obra del ilustrador científico J.C. McConnell.

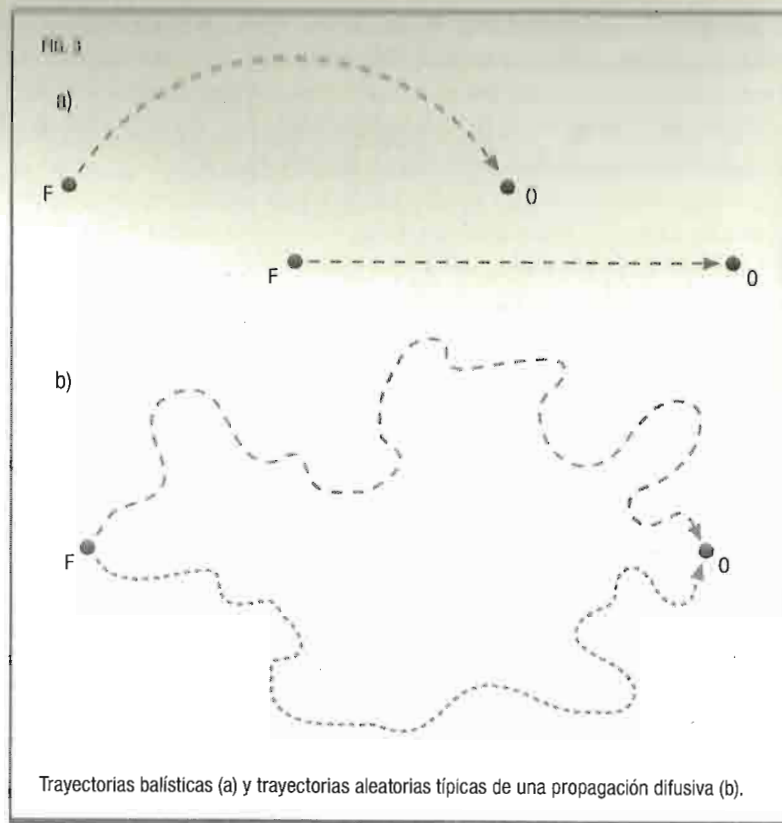
lla se esparce por la galaxia, forma otros objetos astrofísicos o es reciclado en nuevas estrellas. En particular, es el material con el que están hechos el sistema solar o los rayos cósmicos. ¿Cuál es entonces el origen del litio, berilio y boro que no observamos en nuestro entorno pero sí en los rayos cósmicos?

EL CAMINO QUE SIGUEN LOS RAYOS CÓSMICOS

Antes de contestar a la cuestión planteada al final de la sección anterior debemos considerar otra observación fundamental que concierne a los rayos cósmicos: su casi perfecta *isotropía*, es decir, los rayos cósmicos llegan de todas las direcciones con la misma frecuencia. Si sus fuentes están localizadas ello solo puede explicarse si la trayectoria que siguen es tan complicada que al llegar a la Tierra apenas guarda memoria de cuál fue su punto de partida. Para conseguir isotropía precisamos que existan muchas trayectorias distintas que conecten a la fuente con la Tierra, lo que queda ilustrado en la figura 3.

Las dos primeras trayectorias (figura 3a) son una línea recta y una curva «balística». El primer caso corresponde a un rayo cósmico sobre el que no actúa ninguna fuerza cuando se desplaza desde la fuente F hasta el punto de observación O. La dirección en la que se encuentra la fuente F se «ve» directamente en O, ya que coincide con la de llegada de las partículas. En el segundo caso la trayectoria es curvada por una fuerza, por lo que la dirección de llegada ya no indicará la posición de la fuente. En este caso O también «verá» la fuente, pero desplazada hacia arriba y un poco más pequeña que cuando la trayectoria es una línea recta. La razón de la disminución del tamaño es que la distancia efectiva a la que se ve la fuente coincide con la longitud de la trayectoria, la cual es mayor en este segundo caso que la distancia real. En ambos casos hay una sola trayectoria que conecta F con O. Además, la distancia d que la partícula se ha alejado de su fuente crece linealmente con el tiempo t :

$$d = vt,$$



siendo v la velocidad media con la que la partícula se aleja de la fuente F .

En contraste, en las dos trayectorias dibujadas en la figura 3b la partícula experimenta fuerzas que la desplazan de un modo casi aleatorio: primero se aleja en una dirección, luego retrocede, etc. En este caso hay un número muy grande de trayectorias que conectan la fuente con el observador, todas ellas con una longitud mucho mayor que la distancia real entre ellos. Podemos decir que O ve «muchas» pequeñas imágenes de F , o que no ve ninguna. Por ejemplo, cuando nos vemos envueltos en una niebla densa, la luz del Sol choca muchas veces con las gotas de agua que nos rodean antes de alcanzarnos: se trata de luz difu-

sa, que sigue una trayectoria de ese tipo. Pues bien, del mismo modo que en la niebla no vemos el Sol sino rayos de luz procedentes de todas direcciones, si la propagación de los rayos cósmicos es de tipo difusivo no veremos sus fuentes, sino que registraremos una distribución isótropa de llegadas. Otro ejemplo podemos encontrarlo en la propagación de las partículas de un gas. Cuando un objeto desprende olor, las moléculas del gas que transportan ese olor llegan a nuestra nariz tras seguir trayectorias de tipo difusivo.

El régimen difusivo se caracteriza por el hecho de que la distancia d que una partícula se ha alejado de su fuente aumenta de modo proporcional a la raíz cuadrada del tiempo en lugar de linealmente con t :

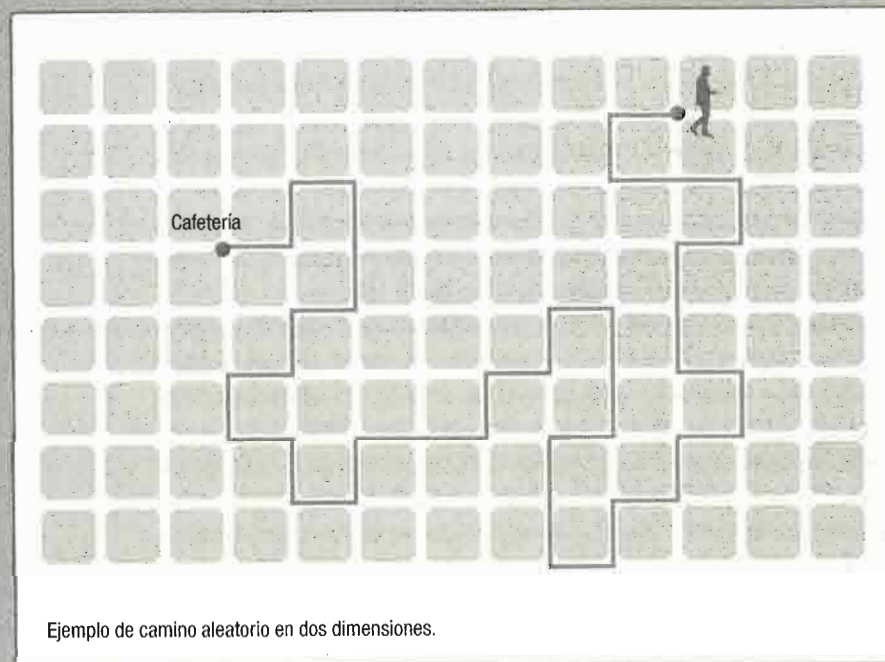
$$d = \alpha\sqrt{t},$$

donde la constante α , relacionada con el llamado *coeficiente de difusión* $D = \alpha^2/2$, viene determinada por la fuerza que actúa sobre la partícula durante su propagación. De hecho, la expresión que hemos dado para d corresponde a una distancia promedio: si F emite un gran número de partículas en todas direcciones, habrá algunas que en ese mismo tiempo se habrán alejado varias veces la distancia d , mientras que otras habrán realizado un viaje de ida y vuelta y se encontrarán al lado de la fuente.

En el caso de los rayos cósmicos, la fuerza que cambia de modo prácticamente aleatorio su dirección se debe a los campos magnéticos presentes en el medio interestelar. En esos campos podemos distinguir dos componentes: una regular, paralela al disco galáctico, y otra componente turbulenta, en forma de remolinos magnéticos de orientación e intensidad variable. La componente regular tiende a «atrapar» a los rayos cósmicos en el interior del disco, favoreciendo el transporte en el plano de la galaxia frente al transporte perpendicular, mientras que la turbulenta produce los cambios aleatorios típicos de un régimen difusivo. Por tanto, los rayos cósmicos siguen una trayectoria larga e irregular desde sus fuentes hasta llegar a la Tierra. Como

CAMINOS ALEATORIOS

La propagación difusiva puede simularse matemáticamente mediante los llamados *caminos aleatorios* (*random walk*). Podemos entender el porqué de ese nombre con un ejemplo, ilustrado en la figura. Supongamos que un individuo sale de una cafetería ligeramente desorientado. Pretende llegar a casa dando un paseo, pero en cada esquina toma cualquiera de las calles que encuentra, cambiando su dirección de modo casi aleatorio (presumamos que el plano de su ciudad está perfectamente cuadrículado). Si la distancia entre esquinas es L (digamos 50 m), ¿dónde se encontrará tras recorrer N travesías (tomemos también $N=50$)? Pues bien, su camino aleatorio puede haberlo alejado de la cafetería una distancia máxima d_{max} de N veces L , es decir, 2500 m, que correspondería a no haber realizado ningún giro en ninguna de las 50 esquinas que encontró. Pero el individuo también podría haber realizado tantos giros a la izquierda como a la derecha y hacia delante como hacia atrás, en cuyo caso habría vuelto al punto de partida. Esta segunda posibilidad es de hecho mucho más probable que la primera, ya que hay muchísimos caminos aleatorios que lo llevan de vuelta a la cafetería, mientras que solo uno lo traslada 2500 m hacia el este. Es posible demostrar que la distancia promedio a la que se encontrará tras recorrer N travesías es \sqrt{NL} , lo que en el caso que nos ocupa corresponde a unos 350 m.



veremos, la cantidad de litio, berilio y boro que observamos en los rayos cósmicos nos permite estimar su tiempo de vuelo.

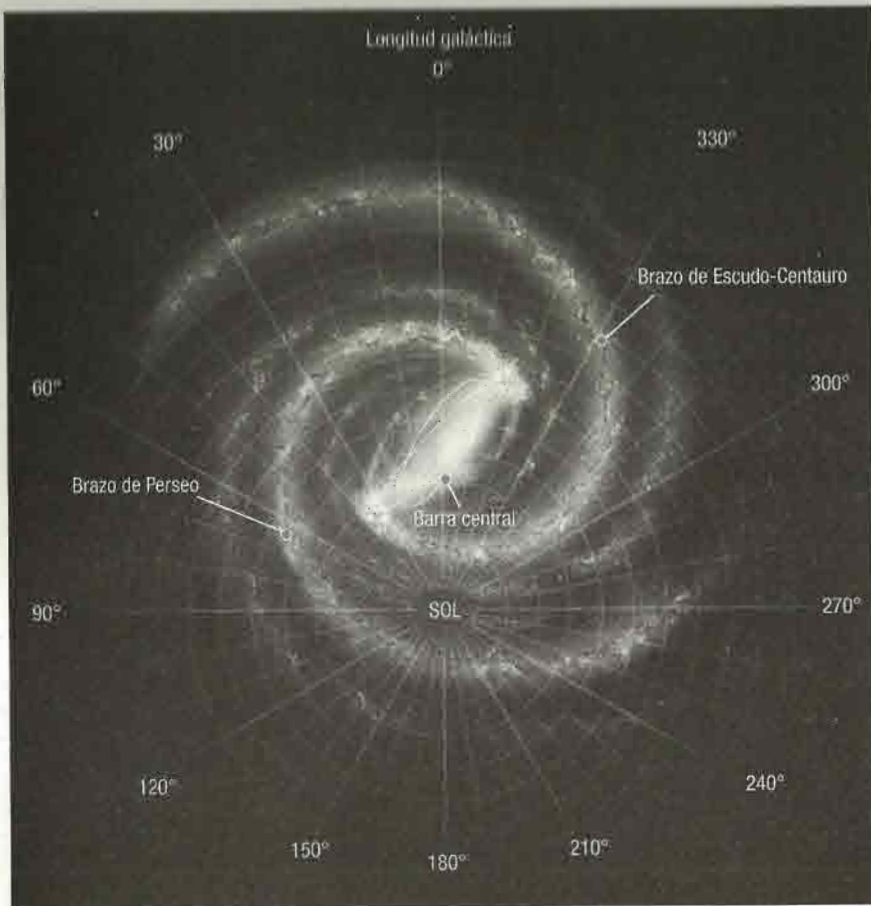
FRECUENCIA DE NÚCLEOS LIGEROS EN LOS RAYOS CÓSMICOS

Los núcleos ligeros apenas son sintetizados en las estrellas: aproximadamente un núcleo de litio, berilio o boro por cada cien mil núcleos medianos de carbono, nitrógeno u oxígeno. Esta es también la abundancia relativa que observamos en el sistema solar, mientras que en los rayos cósmicos los encontramos en una proporción de 1 a 3. Formulemos la siguiente hipótesis: los núcleos ligeros aparecen cuando los medianos, en su viaje tras abandonar las fuentes donde son acelerados, chocan con la materia interestelar y se rompen. Es decir, el litio, el berilio y el boro presentes en los rayos cósmicos son partículas secundarias producidas en las colisiones de los núcleos medianos al propagarse.

Para calibrar la verosimilitud de esta hipótesis es preciso tener una idea siquiera aproximada de cuáles son las dimensiones y el contenido de materia de nuestra galaxia. La unidad que más frecuentemente usan los astrofísicos para medir distancias es el pársec (pc), que corresponde a 3,26 años-luz o $3,08 \cdot 10^{16}$ m, o sus múltiplos el kpc (kilopársec, mil pársecs) y el Mpc (megapársec, un millón de pársecs). Pues bien, en la estructura de la Vía Láctea podemos distinguir dos componentes, una de tipo esférico o *halo* galáctico que se extiende hasta unos 30 kpc y otra en forma de disco que contiene una *barra* central y brazos espirales (figura 4). El disco tiene un grosor de 0,3 kpc y un radio de 15 kpc, con el sistema solar situado a 8,3 kpc del centro.

La masa total de nuestra galaxia estaría en torno a 10^{12} masas solares. En esa masa se estima que la proporción entre *materia oscura* (invisible pero que tiene efectos gravitatorios) y cualquier tipo de materia visible es similar a la que hay en el universo a gran escala, es decir, un gramo de materia visible por cada cinco gramos de materia oscura. En el disco galáctico encontramos más de 10^{11} estrellas y una gran cantidad de materia interestelar: gas (núcleos, átomos, moléculas) y polvo cósmico (granitos de grafi-

FIG. 4



Estructura del disco galáctico, vista desde «arriba». Se indican los brazos espirales principales, la barra central y la posición del Sol. La longitud galáctica, llamada así por analogía con la longitud geográfica terrestre, ayuda a dar una referencia espacial en mapas cósmicos como este.

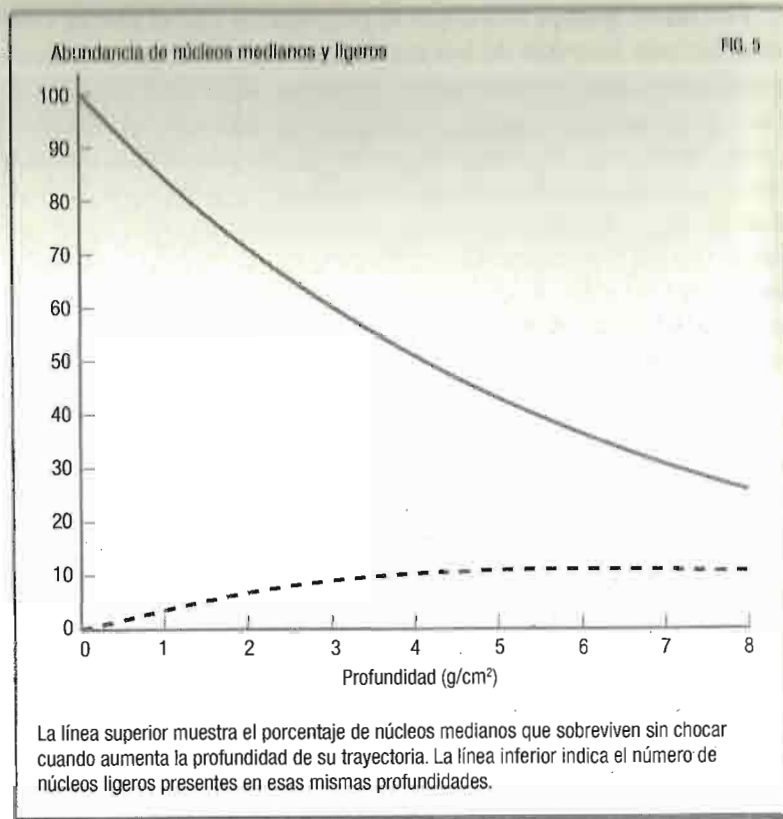
to, silicatos y metales). La materia interestelar representa el 15% de toda la masa visible; en promedio, se estima que la densidad de materia interestelar en el disco galáctico es de un protón por cm^3 . Expresado en gramos, eso corresponde a $1,6 \cdot 10^{-24} \text{ g/cm}^3$.

Por tanto, parece claro que al propagarse por el medio interestelar una fracción de los rayos cósmicos chocará y se romperá, dando núcleos más ligeros. Veamos en qué proporción. Si su trayectoria fuese una línea recta de 8,3 kpc de longitud, que es la distancia de la Tierra al centro galáctico, la cantidad total de materia interestelar que atravesaría el rayo cósmico sería de $0,04 \text{ g/cm}^2$: apenas el equivalente a medio milímetro de agua. Sin embargo, la propagación es difusiva, la trayectoria no es una recta sino una línea enmarañada de longitud total muchísimo mayor. ¿Cuál debe ser esa longitud para obtener la cantidad de núcleos ligeros que se observa en los rayos cósmicos?

Sabemos por experimentos realizados en el laboratorio que un núcleo mediano de carbono, nitrógeno u oxígeno experimenta un choque con la materia al atravesar una profundidad promedio de 6 g/cm^2 . Eso implica que si solo atraviesa $0,6 \text{ g/cm}^2$ tiene una probabilidad del 10% de chocar o, de modo equivalente, que si 10 núcleos atraviesan esos $0,6 \text{ g/cm}^2$ solo uno de ellos sufrirá una colisión. En el laboratorio también observamos que en ese choque el núcleo mediano produce un núcleo ligero de litio, berilio o boro solo el 26% de las veces. Por tanto, supongamos que la fuente que acelera los rayos cósmicos solo emite núcleos medianos; al ir atravesando el medio interestelar una fracción de ellos choca con el gas y el polvo cósmico y se rompe, dando un núcleo ligero en una de cada cuatro colisiones (el 26%). Los núcleos ligeros nacidos de esta forma también tienen cierta probabilidad de chocar: en promedio, experimentan una colisión tras atravesar $8,4 \text{ g/cm}^2$ de materia. En la figura 5 se muestra el número de núcleos medianos y ligeros presentes a distintas profundidades si partimos de 100 núcleos medianos.

En dicha figura observamos que a profundidades en torno a 5 g/cm^2 quedan 44 núcleos medianos de los 100 iniciales, mientras que han aparecido 11 núcleos ligeros. Esa proporción de 1 a 4 es la que se observa en los rayos cósmicos, por lo que deducimos que 5 g/cm^2 es la profundidad media que han atravesado al propagarse desde sus fuentes hasta alcanzar la Tierra.

Obtenemos fácilmente la distancia real que los rayos han recorrido si dividimos esa profundidad por la densidad del medio



interestelar, correspondiente a 1 protón/cm^3 . Es decir, la longitud promedio de la trayectoria de un rayo cósmico es

$$L = \frac{\left(5 \frac{\text{g}}{\text{cm}^2}\right)}{\left(1,6 \frac{10^{-24} \text{ g}}{\text{cm}^3}\right)} = 3,1 \cdot 10^{24} \text{ cm} = 1000 \text{ kpc}.$$

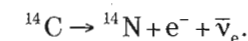
Un análisis más detallado que también incluya los datos sobre la frecuencia de núcleos pesados sugiere una mayor profundidad, próxima a los 10 g/cm^2 , y un valor de 2000 kpc para L . Cualquiera de esas longitudes es muchísimo mayor que el grosor

(0,3 kpc) o el radio (15 kpc) de nuestro disco galáctico, lo que justifica la imagen de los rayos cósmicos atrapados por los campos magnéticos en nuestra galaxia. Los 2000 kpc son recorridos a una velocidad muy próxima a la de la luz: por ejemplo, un protón de 100 GeV se mueve a 0,99995 veces la velocidad de la luz. En consecuencia, el tiempo que los rayos cósmicos invierten en su viaje es de unos 6 millones de años.

EDAD DE LOS RAYOS CÓSMICOS MEDIDA CON NÚCLEOS RADIATIVOS

La edad de los rayos cósmicos al llegar a la Tierra que acabamos de obtener depende de manera muy acusada de la densidad de protones presentes en el medio interestelar. Esa densidad está sujeta a cierto grado de incertidumbre, por ejemplo, podría no ser homogénea sino sustancialmente más grande cerca del lugar donde los rayos cósmicos son acelerados. Sería por tanto conveniente obtener otra estimación basada en un método alternativo; ello puede lograrse estudiando la presencia en los rayos cósmicos de núcleos radiactivos.

Los núcleos radiactivos se caracterizan por no ser estables: decaen al cabo de un tiempo característico que se conoce como *vida media* (τ). Por ejemplo, el carbono-14 (^{14}C , 6 protones y 8 neutrones) vive en promedio 8266 años, tras los cuales se desintegra en



Este proceso puede interpretarse como la conversión en el interior del núcleo de carbono de un neutrón en un protón, un electrón y un antineutrino, lo que se conoce como una *desintegración beta*. La probabilidad de que un núcleo no se haya desintegrado al cabo de un tiempo t vendría dada por la ley exponencial

$$p_{\text{ND}} = e^{-t/\tau},$$

lo que define su vida media τ . Es también usual expresar el ritmo de desintegración de un núcleo radiactivo en términos del periodo de *semivida* o *semidesintegración* ($t_{1/2}$), definido como aquel para el que la probabilidad de que el núcleo se haya desintegrado es de 1/2. Es fácil demostrar que $t_{1/2} = 0,69\tau$. Si tenemos una muestra de un material radiactivo con N_0 núcleos, al cabo de un periodo de semidesintegración el número de núcleos se habrá reducido en un factor 1/2, y así sucesivamente.

Para poner una edad a los rayos cósmicos precisamos un núcleo radiactivo que tenga una vida media muy larga, de modo que no todos los núcleos producidos hayan decaído antes de su llegada a la Tierra. Un buen candidato es el ^{10}Be , que tras una vida media de 2,2 millones de años se desintegra en un boro-10, un electrón y un antineutrino electrónico:

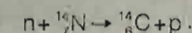


El berilio aparecerá durante la propagación de los rayos cósmicos cuando los núcleos medianos (carbono, nitrógeno y oxígeno) chocan con la materia interestelar. Concretamente, en esas colisiones se formarán 4 núcleos de ^7Be por cada núcleo de ^{10}Be . El ^7Be es estable, por lo que durante su propagación hasta la Tierra no se desintegra ninguno. En cambio, la abundancia de ^{10}Be se reduce en un factor $e^{-t/\tau}$ con el paso del tiempo t transcurrido desde su producción. Se observa que en los rayos cósmicos la relación entre ambos isótopos es de 22 a 1, de lo que puede deducirse que dicho tiempo está en torno a 4 millones de años. Dado que la edad de los núcleos de berilio debe ser algo inferior a la de los núcleos primarios de carbono, nitrógeno y oxígeno que lo originan, el tiempo de propagación de unos 6 millones de años que hemos obtenido anteriormente parece un resultado sólido.

De los argumentos anteriores emerge una imagen clara de cómo los rayos cósmicos se propagan en el interior de nuestra galaxia. Los campos magnéticos *isotropizan* sus trayectorias, que terminan asemejándose al movimiento aleatorio (la difusión) de las partículas que forman un gas. Es de hecho común

DATACIÓN POR CARBONO-14

El ^{14}C es el núcleo radiactivo más usado para determinar el tiempo transcurrido desde que un ser vivo dejó de estarlo. Veamos cómo funciona. Cuando los rayos cósmicos penetran en la atmósfera producen gran cantidad de neutrones, algunos de los cuales reaccionan con el nitrógeno del aire para dar carbono-14:

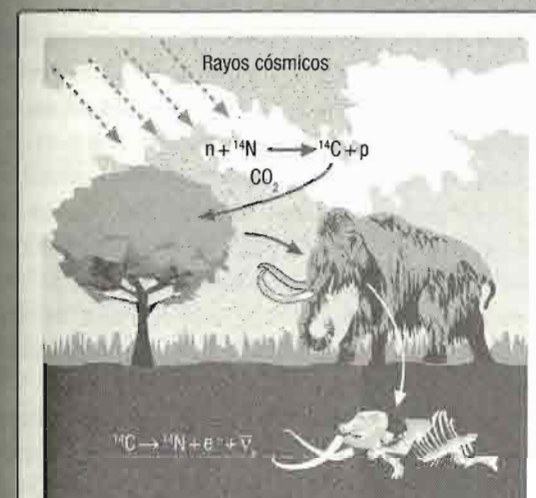


El carbono tiene dos isótopos estables, el ^{12}C y el ^{13}C , pero el ^{14}C es inestable, se desintegra, reduciendo su cantidad inicial a la mitad cada 5730 años. Como el flujo de rayos cósmicos que bombardea la Tierra es prácticamente constante, la cantidad de ^{14}C en la atmósfera se estabilizará cuando el ritmo de producción por los rayos cósmicos coincida con el ritmo de desintegraciones. Ello corresponde a 1,0-1,3 núcleos de ^{14}C por 10^{12} de ^{12}C . Pues bien, esa proporción entre ^{14}C y ^{12}C se encuentra en el aire y en las plantas, las cuales fijan el CO_2 atmosférico durante la fotosíntesis. Se encuentra también en cualquier organismo que coma plantas u otros animales, o en los objetos (ropa, etc.) hechos con plantas. Una vez que el animal o la

planta mueren, su material orgánico ya no se renueva, y al cabo de un tiempo t la fracción de ^{14}C se habrá reducido en un factor $e^{-t/\tau}$. La proporción entre el ^{14}C y el ^{12}C puede determinarse analizando la muestra, y el resultado indica cuánto tiempo hace que el individuo del que procede dejó de comer, es decir, dejó de estar vivo.

Alta precisión

El método puede tener en cuenta las variaciones en el nivel de ^{14}C atmosférico debidas a alteraciones en el flujo de rayos cósmicos, que a su vez estarían relacionadas con cambios en el campo magnético terrestre. Puede alcanzarse una precisión de 16 años para restos orgánicos con 6 000 años de antigüedad o de 160 años cuando la edad es de 26 000 años.



Los rayos cósmicos producen neutrones que al chocar con el ^{14}N lo transforman en ^{14}C . El carbono se combina con oxígeno para formar moléculas de CO_2 que son absorbidas por las plantas, que a su vez lo pasan a los animales en la cadena alimentaria. Una vez mueren, la cantidad de ^{14}C en sus restos va reduciéndose con el paso del tiempo.

referirse a ellos como el *gas de rayos cósmicos*. Durante su propagación chocan con las partículas en el medio interestelar y forman núcleos que son muy poco abundantes en el sistema solar. Los datos indican que encuentran una densidad de alrededor de 1 protón/cm³ y que están viajando en torno a 6 millones de años desde sus fuentes antes de alcanzarnos. Por tanto, ese es el tiempo aproximado que los rayos cósmicos están atrapados en nuestra vecindad antes de dejar el disco galáctico.

Para concluir, debemos mencionar que no todos los rayos cósmicos que observamos tienen un origen galáctico. Veamos cómo puede llegarse a esa conclusión.

El campo magnético regular en nuestra galaxia tiene una intensidad en torno a 4 μ G (microgauss; el prefijo *micro* indica una millonésima parte). La trayectoria de un protón de energía 10⁹ GeV en el seno de ese campo magnético tiene un radio de giro cercano a los 0,3 kpc. Dado que ese es el grosor del disco galáctico, deducimos que por encima de esas energías los campos magnéticos son incapaces de atrapar a los rayos cósmicos en el disco galáctico. La trayectoria de esos rayos cósmicos en un tramo interior a nuestra galaxia deja de ser difusiva y pasa a ser balística. Por tanto, si sus fuentes fueran galácticas esperaríamos que la distribución de llegadas revelara su posición. No es eso lo que observamos: vemos un número similar de sucesos muy energéticos procedentes de las regiones centrales de la galaxia o de la dirección contraria. Ello indica que los rayos cósmicos de energía entre 10⁹ y 10¹¹ GeV que detectamos tienen un origen extragaláctico.

En el espacio intergaláctico de donde proceden, estos rayos cósmicos también encuentran campos magnéticos que curvan su trayectoria. Para estimar las distancias involucradas, podemos comparar el tamaño típico de una galaxia, 10 kpc, con el de un *cúmulo de galaxias*, 1 Mpc (es decir, 1 000 kpc), y la distancia entre cúmulos, 10 Mpc. Los cúmulos se distribuyen en estructuras filamentosas donde el campo magnético es de orden 1 μ G, y entre esos filamentos encontramos *vacíos* donde el campo magnético sería 1 000 veces menos intenso. Un campo de 1 μ G actuando a lo largo de 100 kpc produciría en un rayo cósmico

de 10¹¹ GeV (las mayores energías registradas hasta la fecha) un giro de 45°, por lo que hay pocas esperanzas de que los rayos cósmicos cargados revelen la posición de sus fuentes.

Cualitativamente, los rayos cósmicos extragalácticos deben proceder de distancias por encima de 100 kpc. Al ser más energéticos que los galácticos su trayectoria resulta menos sensible a los campos magnéticos que la de estos, e invierten menos tiempo en recorrer una misma distancia. En consecuencia, aunque su procedencia sea más lejana su edad no tiene por qué ser muy diferente. Durante su propagación también pueden chocar con la materia en el medio intergaláctico, pero ese medio es tan tenue que deben recorrer distancias de miles de Mpc para tener una probabilidad apreciable de colisión. Por tanto, la edad, la composición y el origen de estos rayos cósmicos extragalácticos es en gran medida una incógnita.

La fuente de la que las cosas derivan su existencia es también aquella a la que regresan al ser destruidas.

ANAXIMANDRO

ANTIMATERIA EN LOS RAYOS CÓSMICOS

La materia de la que estamos hechos es estable, y ello se debe a que existe una serie de *números cuánticos* que se conservan en cualquier reacción o desintegración: la carga eléctrica, el número bariónico (número de protones y neutrones) y el leptónico (electrones y muones más neutrinos). Particularmente, el número de bariones puede entenderse como el número neto de materia. El protón es el barión más ligero; si pudiese desintegrarse dando piones, leptones o luz la Tierra terminaría por disolverse, evaporarse, dando gran cantidad de radiación.

Esa estabilidad de la materia es también una prueba de que la cantidad de *antimateria* en nuestro entorno es insignificante. La antimateria aparece en física de partículas por razones de *simetría*. Si, tal como supone la teoría de la relatividad, todos los observadores inerciales son equivalentes, entonces el electrón y el protón no pueden estar solos: deben existir sus antipartículas,

el positrón y el antiprotón, con las mismas propiedades que los primeros pero con cargas y números cuánticos opuestos. Sabemos de la simetría materia-antimateria desde que Paul Dirac formuló su mecánica cuántica relativista en 1928.

La libertad intelectual es la única garantía de una aproximación científico-democrática a la política, el desarrollo económico y la cultura.

ANDRÉI SÁJAROV

y la antimateria en el universo o, como mínimo, en la región del universo en la que vivimos.

Una partícula de antimateria tiene la peculiaridad de que puede reaccionar con la correspondiente partícula de materia y aniquilarse, dando luz o pares de partículas con carga total cero. Es decir, el antiprotón tiene número bariónico -1 , y al encontrarse con un protón nada les impide reaccionar dando radiación pura, sin materia. De modo análogo pero en sentido inverso, si dos fotones chocan con suficiente energía pueden crear un par protón-antiprotón. De hecho, esas reacciones ocurrían frecuentemente en el universo primitivo durante los instantes iniciales tras el Big Bang: a temperaturas por encima de 1 GeV la cantidad de materia, antimateria y radiación era muy similar. Similar pero no idéntica, de otro modo en la actualidad no observaríamos un universo hecho de materia. Se estima que debía haber un número ligerísimamente inferior de antibariones que de bariones: en torno a diez mil millones de los primeros por cada diez mil millones más uno de los segundos. Cuando la temperatura fue bajando por debajo de 1 GeV los protones y neutrones podían aniquilarse dando radiación pero la reacción inversa dejó de ser efectiva, de modo que esos diez mil millones de antibariones se aniquilaron con los correspondientes bariones y solo la pequeñísima asimetría en favor de la materia sobrevivió.

Por otro lado, todo lo que conocemos está hecho de materia, no de antimateria. Podrían existir átomos, personas y planetas hechos de antiprotones, antineutrones y positrones, pero hasta ahora no hemos encontrado ningún indicio de que esos objetos existan. Es por tanto evidente que existe una asimetría entre la materia

GENERACIÓN DE LA ASIMETRÍA MATERIA-ANTIMATERIA

En 1967, el físico y Nobel de la Paz Andréi Sájarov propuso tres condiciones bajo las cuales podría generarse una asimetría materia-antimateria en el universo primitivo a partir de condiciones iniciales de igualdad entre ambas especies.



Andréi Sájarov en 1989.

Las tres condiciones

Un primer lugar se precisan condiciones de no equilibrio termodinámico. Supongamos que existe una partícula X inestable y extremadamente pesada, con una masa m_X de 10^{15} GeV . Al tener una masa tan extrema no podemos producirlas en el laboratorio, pero habrían sido abundantes durante el Big Bang a temperaturas por encima de su masa, ya que se crearían como resultado de las colisiones entre partículas ligeras. La condición de no equilibrio enunciada por Sájarov se refiere a que las partículas X deben tener acoplamientos débiles, de modo que cuando la temperatura del universo baja por debajo de m_X estas partículas no decaen instantáneamente sino que su abundancia pasa a estar por encima de lo que dictaría el equilibrio termodinámico. Es decir, la desintegración de partículas X dando radiación debe producirse predominantemente cuando el proceso inverso (la creación de partículas X a partir de radiación) no pueda ya producirse. La segunda condición que debe darse es que en la desintegración de esa partícula X se viole el número bariónico. Es decir, que existan canales de desintegración con distinto número de protones y neutrones en el estado final. Por ejemplo, la condición se verificaría si el 70% de las veces X se desintegra en leptones y mesones (con número bariónico cero) y el 30% restante en un estado final que incluye un protón (número bariónico 1). Por último, es preciso que también se viole la simetría CP , que relaciona a la partícula X con su antipartícula \bar{X} . En el universo temprano habrá la misma cantidad de ambas especies, \bar{X} y X . Por tanto, si \bar{X} da al decaer tantos antibariones como X da bariones, el número bariónico neto generado será nulo. Si la simetría CP está rota, en cambio, es posible que \bar{X} decaiga en el modo sin bariones el 70,1% de las veces y en el modo con un antiprotón el 29,9%, lo que generaría la asimetría deseada:

$$X \rightarrow e^- + \pi^+ + \pi^- \quad (70\%)$$

$$X \rightarrow e^- + \pi^+ + p \quad (30\%)$$

frente a

$$\bar{X} \rightarrow e^+ + \pi^- + \pi^+ \quad (70,1\%)$$

$$\bar{X} \rightarrow e^+ + \pi^- + \bar{p} \quad (29,9\%)$$

produce un protón neto por cada 1000 desintegraciones de X y \bar{X} .

Cómo apareció esa asimetría es una cuestión que sigue hoy abierta, ya que no puede explicarse con solo el modelo estándar de la física de partículas, se precisa física no estándar. Es un problema de *condiciones iniciales* y de *naturalidad*. Es posible que el universo haya sido creado con un número distinto de materia y antimateria, y que no existan procesos a ninguna energía que violen la conservación del número bariónico. En ese caso la asimetría inicial se habría mantenido hasta hoy a través de todos los procesos que han ido ocurriendo durante el Big Bang. Es decir, el número de bariones y el número de antibariones serían dos *parámetros libres* de nuestro modelo de universo, y la pequeña diferencia inicial entre esos dos parámetros explicaría que el universo esté hoy hecho de materia. El problema de esta posibilidad es *estético*, ya que no parece natural que dos números que pueden tomar cualquier valor sean muy parecidos pero distintos: no es natural que la diferencia entre dos números independientes de orden diez mil millones sea uno. Es más razonable suponer que el número inicial era el mismo, y que la pequeña diferencia apareció a través de procesos que *rompen una simetría*, en este caso, la simetría que conserva el número bariónico. De hecho, es así como entendemos en la actualidad esa asimetría (véase el recuadro de la página anterior).

En cualquier caso, la presencia de antimateria en los rayos cósmicos es una cuestión de gran interés, puesto que la detección de una cantidad anómala de la misma podría revelar la existencia de física no estándar. Positrones y antiprotones son creados junto a sus correspondientes partículas durante la propagación de los rayos cósmicos primarios, cuando estos chocan con la materia interestelar. Por tanto, esperamos encontrar una pequeña fracción de antipartículas en el flujo de rayos cósmicos que llega a la Tierra. Ello se ha visto confirmado por las observaciones en el instrumento satelital PAMELA (*Payload for Antimatter Matter Exploration and Light-nuclei Astrophysics*) y en el detector AMS (*Alpha Magnetic Spectrometer*) de la EEL. En particular, el número y el espectro de antiprotones concuerdan con los valores esperados, mientras que el espectro de positrones está ofreciendo datos de gran interés. Las observaciones

muestran un exceso de electrones y también de positrones a energías alrededor de 100 GeV, lo que subrayaría el papel de los púlsares y otras fuentes astrofísicas en la producción de pares electrón-positrón. Los datos también han motivado numerosos análisis sobre la posibilidad de que la aniquilación de partículas de materia oscura sea el origen de dicho exceso.

Aceleradores de rayos cósmicos

Los rayos cósmicos llegan a la Tierra con una energía millones de veces superior a la de las partículas procedentes de una explosión nuclear. El proceso por el que adquieren esa energía es un ciclo en el que esta se incrementa en tan solo un 1 %, pero que puede repetirse muchas veces.

La palabra espectro se refiere al conjunto de valores que puede tomar la energía y a la frecuencia de cada uno de esos valores. En el caso de los rayos cósmicos, la energía varía entre 1 y 10^{11} GeV. Para hacernos una idea de cuál es la amplitud de ese intervalo de energías, podemos mencionar que la diferencia relativa entre la menor y la mayor de ellas es equivalente a la diferencia de energía cinética que hay entre un avión de papel de 2 g que se mueve a 3 m/s (10,8 km/h) y un Boeing 777 de 200 000 kg volando a una velocidad de 950 km/h. A pesar de esa variabilidad tan grande, el espectro tiene una notoria simplicidad (figura 1), lo que sugiere que la naturaleza ha utilizado la misma estrategia para acelerar el avión de papel y el Boeing 777.

El espectro viene dado por una ley de potencias de tipo $E^{-\alpha}$, donde α es una constante que cambia ligeramente de 2,7 a 3 a energías en torno a $10^{6,5}$ GeV, lo que se conoce como la *rodilla* del espectro, y vuelve a cambiar de 3 a 2,7 en el *tobillo*, a $10^{9,5}$ GeV. El exponente $-\alpha$ que aparece en la ley de potencias expresa cómo se reduce el número de rayos cósmicos al aumentar su energía. En particular, indica que su número se reduce en un factor $10^{-\alpha+1}$ cuando la energía aumenta en un factor 10. Por ejemplo, si en

nuestro detector entran 10 000 rayos cósmicos con energía por encima de 10^7 GeV, solo 100 de ellos tendrán una energía superior a 10^8 GeV y tan solo 1 alcanzará una energía mayor que 10^9 GeV. Es decir, dado que el índice en esa región del espectro es $\alpha=3$, el número de rayos cósmicos se reduce en un factor $10^{-3+1}=0,01$ cuando la energía aumenta en un factor 10. Un índice espectral

Como no estás experimentado en las cosas del mundo, todas las cosas que tienen algo de dificultad te parecen imposibles.

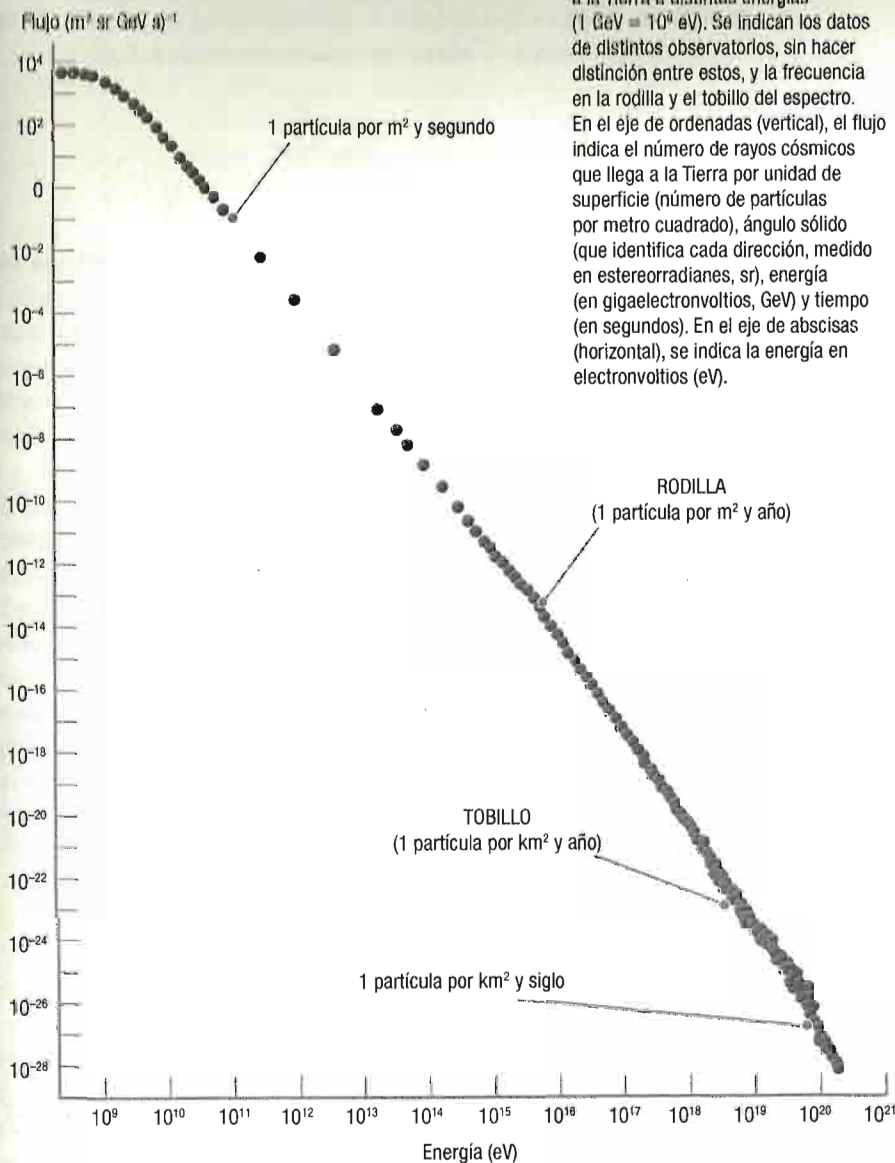
MIGUEL DE CERVANTES EN
DON QUIJOTE DE LA MANCHA

$\alpha=2$ estaría asociado a una menor reducción con la energía, el factor multiplicativo sería $10^{-2+1}=0,1$ en lugar de 0,01, mientras que el caso con $\alpha=1$ sería especial: indicaría que todas las energías están igualmente representadas. El espectro de los rayos cósmicos no tiene esa propiedad sino que exhibe una fuerte supresión de la

región de alta energía (figura 1). El hecho de que prácticamente un solo índice espectral describa todo el espectro apunta a un mecanismo universal de aceleración para los rayos cósmicos.

Hay dos aspectos importantes relativos a este espectro que conviene enfatizar. El primero es su carácter no térmico, es decir, los rayos cósmicos no se caracterizan por tener una temperatura. Ya hemos mencionado en el capítulo anterior que una distribución térmica a temperatura T se da cuando las partículas que forman el sistema son capaces de intercambiar energía a través de colisiones; en cada colisión pueden ganar o perder energía, manteniéndose constante la energía global del sistema. El equilibrio térmico se alcanza cuando las partículas consiguen distribuir la energía disponible de la forma más probable. Ello corresponde a una distribución de Maxwell-Boltzmann, en la que la mayoría de ellas tiene una energía cinética en torno a $k_B T$. Sin embargo, la distribución térmica incluye también la posibilidad de que algunas partículas hayan experimentado un número relativamente grande de colisiones en las que ganan energía en lugar de perderla, por lo que aparecen con una energía muy por encima de la media. Podríamos decir que si el sistema está formado por muchas partículas, es más probable encontrar algunas anormalmente energéticas (por

FIG. 1



Flujo de rayos cósmicos que llegan a la Tierra a distintas energías ($1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$). Se indican los datos de distintos observatorios, sin hacer distinción entre estos, y la frecuencia en la rodilla y el tobillo del espectro. En el eje de ordenadas (vertical), el flujo indica el número de rayos cósmicos que llega a la Tierra por unidad de superficie (número de partículas por metro cuadrado), ángulo sólido (que identifica cada dirección, medido en estereorradianes, sr), energía (en gigaelectronvoltios, GeV) y tiempo (en segundos). En el eje de abscisas (horizontal), se indica la energía en electronvoltios (eV).

ejemplo, diez veces la temperatura) que no encontrarías. Estas *colas* de la distribución térmica (figura 2) disminuyen a alta energía de forma exponencial: la probabilidad de encontrar una partícula de energía E mayor que la temperatura T es

$$p(E) \propto E^2 e^{-E/k_B T}.$$

La dependencia exponencial suprime las altas energías mucho más deprisa que una ley de potencias como la observada en los rayos cósmicos. Por ejemplo, si tenemos un millón de partículas de energía $k_B T$, una distribución térmica incluiría solo una con energía 20 veces más grande. En cambio, si la distribución de energía corresponde a la ley de potencias de los rayos cósmicos descrita anteriormente tendríamos alrededor de 2500.

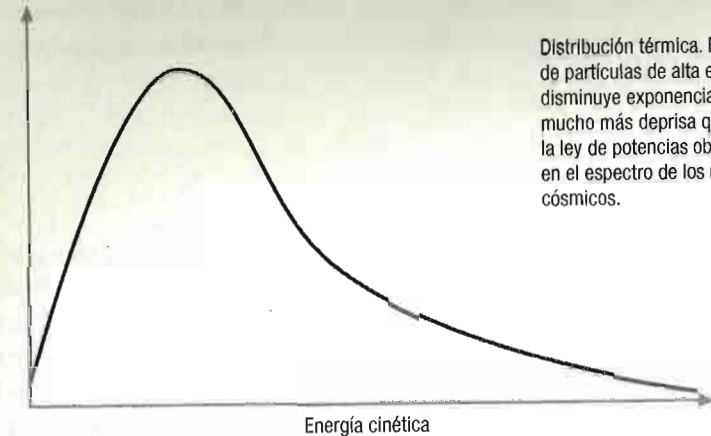
El segundo aspecto relativo al espectro que nos gustaría remarcar hace referencia al hecho de que la energía de las partículas que intervienen en una colisión no es un concepto absoluto, sino que depende del sistema de referencia en el que se hacen las medidas. Veamos qué significa eso exactamente. Supongamos que en el laboratorio observamos que un protón moviéndose a velocidad v mucho menor que la velocidad c de la luz se acerca a otro protón que se encuentra en reposo. Llamaremos *proyectil* al primer protón y *blanco* al segundo (figura 3). Por el hecho de estar en movimiento, el proyectil tiene una cierta energía cinética, en particular,

$$E_{\text{cin}} = \frac{1}{2} m_p v^2,$$

donde m_p es su masa. Consideremos ahora a otro observador O' que persigue al proyectil a una velocidad $v/2$, tal como se muestra en la figura 4. Este observador medirá que el proyectil se mueve a una velocidad inferior respecto a él, $v/2$, y que el blanco no está en reposo sino que se le acerca a velocidad $v/2$.

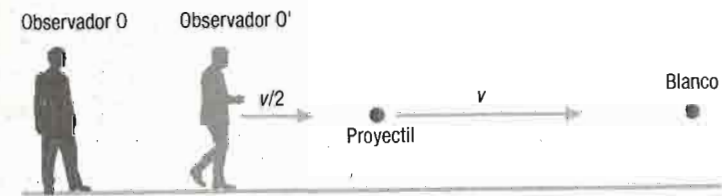
FIG. 2

Número de partículas por unidad de volumen y de energía



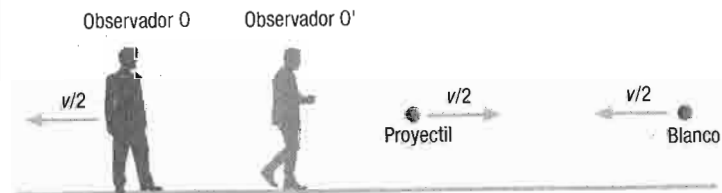
Distribución térmica. El número de partículas de alta energía disminuye exponencialmente, mucho más deprisa que con la ley de potencias observada en el espectro de los rayos cósmicos.

FIG. 3



Desde el punto de vista del observador O , el blanco está inmóvil, el proyectil avanza a una velocidad contra dicho blanco, y el observador O' avanza a la mitad de esa velocidad en el mismo sentido del proyectil.

FIG. 4



Punto de vista del observador O' . El observador O' se acerca al blanco con velocidad $v/2$, por lo que en su sistema de referencia es el blanco el que se acerca con esa velocidad. Además, ve al proyectil avanzando contra el blanco también a $v/2$ en vez de a v , y al observador O alejándose de él a igual velocidad en el sentido contrario del proyectil.

Hagamos ahora un balance de la energía cinética total que capta cada observador. El primero mide $1/2 (m_p v^2)$ al proyectil y una energía nula al blanco, que está en reposo, mientras que O' observa que tanto proyectil como blanco tienen una misma energía:

$$\frac{1}{2} m_p \left(\frac{v}{2} \right)^2 = \frac{1}{8} m_p v^2.$$

Por tanto, sumando la energía de ambas partículas el segundo observador contabilizará una energía total de

$$\frac{1}{4} m_p v^2,$$

la mitad de la que asegura ver el primero. Es importante notar que se trata de la misma colisión observada por distintos observadores: el relato de lo que ocurre durante dicha colisión debe ser el mismo en sus aspectos fundamentales, como la *dinámica* (las fuerzas que una partícula ha ejercido sobre la otra durante la colisión), aunque otros aspectos *cinemáticos* (la posición o la velocidad de las partículas) puedan parecer muy distintos. Entender cómo se relacionan las medidas realizadas por distintos observadores ha sido un tema fundamental de la física resuelto por Albert Einstein y su teoría de la relatividad a principios del siglo xx. Pero volvamos a la cuestión que nos ocupa. Dado que su valor es *relativo*, ¿cuál es realmente la energía de la colisión? Pues bien, en física de partículas esta se identifica con la que vería el observador en el llamado sistema de referencia *centro de masas*, el cual minimiza la energía total del sistema formado por el proyectil y el blanco. En este caso, se trataría del segundo observador, O'.

Cuando un rayo cósmico de 10^8 GeV entra en la atmósfera y choca con un protón en el interior de un núcleo de aire la energía en la colisión medida en el sistema laboratorio donde

LA PARTÍCULA «OH DIOS MÍO» (OMG)

La partícula OMG (por la expresión inglesa *Oh My God!*, «¡Oh Dios mío!», que su magnitud energética mereció) cruzó el cielo sobre el desierto de Utah, en Estados Unidos, en la noche del 15 de octubre de 1991. La breve señal de luz (apenas una milésima de segundo) producida en la atmósfera a su paso fue detectada por el observatorio Fly's Eye y analizada por los ordenadores del experimento. Los datos parecían indicar $3,2 \cdot 10^{11}$ GeV: una energía inmensa y totalmente inesperada. Fly's Eye era un experimento pionero en la detección de rayos cósmicos a partir de la luz de fluorescencia que estos producen al entrar en la atmósfera, quizá poco sofisticado para los estándares actuales, pero que funcionaba magníficamente. Las comprobaciones y discusiones tras la observación de OMG duraron un año, pero no hicieron más que confirmar el resultado inicial.

Cuestión de suerte

La partícula OMG representa todavía hoy el récord de energía detectada en un experimento de rayos cósmicos. El observatorio japonés AGASA (*Akeno Giant Air Shower Array*) registró dos años después otro suceso «imposible» de $2 \cdot 10^{11}$ GeV, mientras que el Auger cuenta hasta ahora con 5 cascadas atmosféricas de energía por encima de 10^{11} GeV. Sin embargo, ni siquiera HiRes (*High Resolution Fly's Eye*) o Telescope Array, experimentos que constituyen una continuación de Fly's Eye en el desierto de Utah, han conseguido igualar ese récord. Aparentemente la observación de OMG fue una cuestión de suerte: había una probabilidad entre mil de que un experimento de ese tamaño cazase un suceso tan energético. En cualquier caso se trató de una coincidencia afortunada: la observación de OMG representó una de las principales motivaciones para la construcción de la siguiente generación de este tipo de experimentos. OMG era probablemente un protón de velocidad casi idéntica a la de la luz, en una carrera con un fotón de luz hasta el centro de nuestra galaxia, a 32 000 años-luz de distancia, este tan solo le habría sacado 1,4 mm de ventaja...



Panorámica de la zona del estado de Utah captada desde el espacio. Por sus cielos cruzó la noche del 15 de octubre de 1991 la partícula OMG.

el blanco se encuentra en reposo es enorme. Sin embargo, un observador que persiguiese a ese rayo cósmico a suficiente velocidad vería que su energía se reduce a 7 000 GeV, al tiempo que la energía del protón atmosférico antes en reposo pasaría a ser también 7 000 GeV. Por tanto, la energía de la colisión en el sistema centro de masas sería de 14 000 GeV. Esa es exactamente la energía de las colisiones protón-protón que se están realizando actualmente en el acelerador LHC (*Large Hadron Collider*) del CERN en Ginebra. Es decir, la colisión de un rayo cósmico de 10^8 GeV al entrar en la atmósfera tiene una energía equivalente a la de las colisiones que se dan en el LHC. Por encima de esa energía, hasta 10^{11} GeV, nos encontramos en territorio no explorado en colisionadores.

Es además interesante señalar que uno de esos rayos cósmicos de 10^8 GeV podría también chocar en el espacio exterior con otro rayo cósmico de similar energía. Una estimación muestra que dichos choques ocurren en el interior del sistema solar a un ritmo aproximado de uno cada 2 minutos. Aunque son colisiones que por su monstruosidad harían las delicias de cualquier físico de altas energías, no parece que exista ninguna posibilidad de que puedan llegar a ser observadas.

En el LHC se usa tecnología punta con imanes superconductores y campos electromagnéticos intensísimos para acelerar protones hasta 7 000 GeV. En la naturaleza los aceleradores cósmicos consiguen llegar millones de veces más lejos, al menos hasta 10^{11} GeV. Para acelerar protones hasta esa energía usando la tecnología actual precisaríamos de un acelerador con 15 000 km de circunferencia. Veamos qué puede estar usando la naturaleza. Antes, sin embargo, puede resultar revelador discutir cuál debe ser la potencia que tienen esos aceleradores cósmicos.

LA GRANDEZA DE LOS ACELERADORES CÓSMICOS

En el capítulo anterior hemos argumentado que la edad de los rayos cósmicos que llegan a la Tierra es de unos 10 millones de años. Por consiguiente, es lógico pensar que ese es también el

tiempo promedio que permanecen confinados en el disco galáctico antes de escapar al espacio exterior. Sumando toda la energía que observamos en el espectro de rayos cósmicos deducimos que la densidad de energía en forma de rayos cósmicos se halla alrededor de 1 eV/cm^3 ; dado que el volumen del disco, con 0,3 kpc de grosor por 15 kpc de radio, es de unos $5 \cdot 10^{66} \text{ cm}^3$, el acelerador cósmico debe suministrarles un total de $5 \cdot 10^{66} \text{ eV}$ de energía cada 10 millones de años. Esto corresponde a una potencia

$$P_{\text{RC}} = 3 \cdot 10^{40} \text{ erg/s.}$$

Es decir, los rayos cósmicos se escapan del disco galáctico llevándose consigo $3 \cdot 10^{40}$ erg (ergios) de energía cada segundo; para mantener constante el flujo de rayos cósmicos que observamos en la Tierra es necesario que *algo* les aporte una cantidad de energía equivalente.

¿Y qué objetos astrofísicos desarrollan una potencia de ese orden en el interior de nuestra galaxia? Bien, las explosiones de supernova descritas a grandes trazos en el capítulo anterior son una posibilidad que parece prometedora. Durante el colapso del núcleo de la estrella su enorme energía gravitatoria se libera en forma de neutrinos y de gran cantidad de materia (unas diez masas solares) expulsada con una velocidad de 5 000 km/s. La explosión emite una onda de choque que luego define el remanente de supernova, una enorme bola de plasma capaz de expandirse de manera espectacular durante más de un millar de años, con una energía cinética total del orden de $3 \cdot 10^{51}$ erg.

Se estima que en una galaxia como la nuestra se producen una media de tres explosiones de supernova por siglo. Teniendo en cuenta que un siglo son $3 \cdot 10^9$ segundos, la potencia desarrollada por los remanentes de supernova galácticos sería de

$$P_{\text{RS}} = 3 \cdot 10^{42} \text{ erg/s.}$$

¿CÓMO OBTENER UN ESPECTRO DESCRITO POR UNA LEY DE POTENCIAS?

El proceso genérico por el que los rayos cósmicos ganan energía fue desarrollado por Enrico Fermi en 1949. Se trata de un proceso *estocástico*, es decir, no determinista, donde la partícula incrementa ligeramente su energía tras cada *ciclo de aceleración*. Al existir cierta probabilidad de que el ciclo se repita muchas veces, una fracción de las partículas adquirirá una energía muy alta.

Ganancia energética y leyes de potencias

Veamos cómo aparecería una ley de potencias de tipo E^{-k} . En primer lugar debemos suponer que en cada ciclo de aceleración la partícula gana en promedio una fracción f de energía: si entra en el ciclo con energía E_0 , saldrá con energía $(E_0 + f E_0)$. La energía de la partícula tras completar k ciclos es entonces

$$E = E_0 (1+f)^k$$

Por otro lado, es también razonable pensar que la partícula tiene una cierta probabilidad p de escapar y no entrar en el siguiente ciclo. Si inicialmente tenemos N_0 partículas, tras el primer ciclo se pierden pN_0 y quedan $N_0(1-p)$. Tras k ciclos el número de partículas que quedan es

$$N = N_0 (1-p)^k$$

Como esas N partículas habrán completado al menos k ciclos de aceleración, su energía será mayor o igual a E . En las dos expresiones anteriores podemos expresar el exponente k en términos de las otras cantidades. Igualando obtenemos la relación

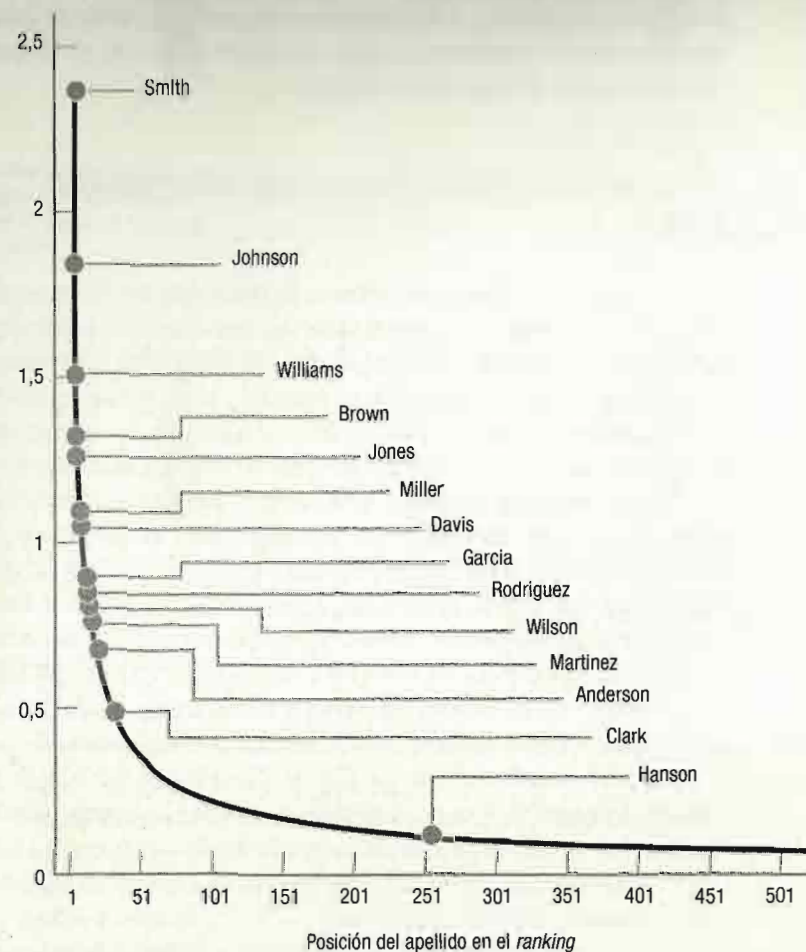
$$N = N_0 \left(\frac{E}{E_0} \right)^{\frac{1-p}{1+p}}$$

Por ejemplo, si en cada ciclo se gana un 1% de energía ($f=0,01$) y la probabilidad de escapar es del 3% ($p=0,03$), entonces se deduce que el número de partículas con energía por encima de E sigue la ley

$$N = N_0 \left(\frac{E}{E_0} \right)^{-0,3}$$

Las leyes de potencias se encuentran muy frecuentemente en la naturaleza: describen fenómenos tan dispares como la relación entre el tamaño y la frecuencia de los terremotos o la posición relativa y la frecuencia absoluta de los apellidos en cualquier país. Un ejemplo de esto último se muestra en la figura.

Millones de personas con el apellido



La posición p en el *ranking* de los distintos apellidos en Estados Unidos (censo del año 2000) y el número N de habitantes con ese apellido, expresado en millones. Ambas cantidades están relacionadas por la ley de potencias $N = 2,3 \cdot 10^6 p^{-0,4}$.

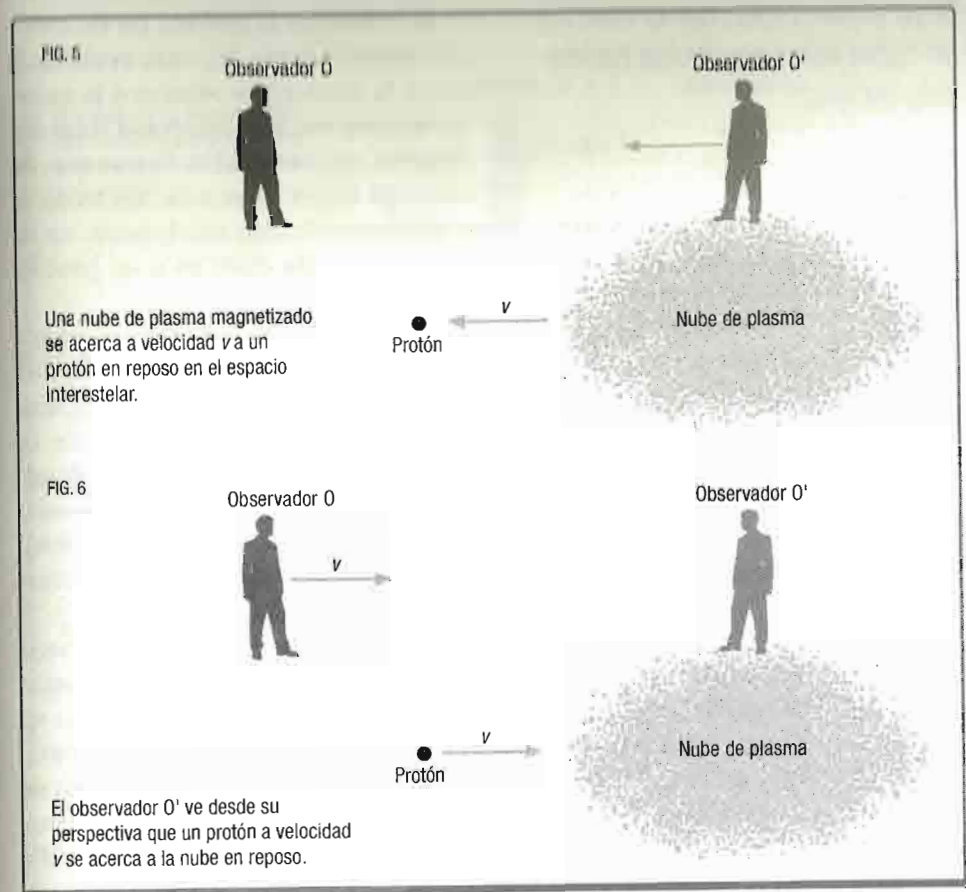
Por tanto, observamos que la transferencia de un 1% de esa potencia a los rayos cósmicos sería suficiente para mantener su densidad en el disco galáctico constante. El balance energético que acabamos de presentar fue propuesto en 1964 por el soviético Vitali Guinzburg, y se considera un indicio claro de que los remanentes de supernova juegan un papel clave en el origen de la mayor parte de los rayos cósmicos.

LA TRANSMISIÓN ENERGÉTICA GRACIAS AL MECANISMO DE FERMI

El mecanismo de Fermi explicaría la transmisión de energía cinética de un plasma magnetizado en movimiento a partículas individuales. Cuando hablamos de *plasmas* nos referimos al considerado cuarto estado de la materia, la cual puede también encontrarse en estado sólido, líquido o gaseoso. Lo que caracteriza al plasma es que las partículas que lo forman están cargadas: son iones positivos (núcleos atómicos) y negativos (electrones) en igual número, de modo que la carga total es nula. Los plasmas adquieren la forma del recipiente que los contiene tal como ocurre con los gases, pero a diferencia de estos pueden formar estructuras filamentosas, haces, o superficies cuando se encuentran bajo la influencia de campos magnéticos. El Sol o el medio interestelar son plasmas, mientras que Júpiter y la Tierra no lo son; el 99,9% de la materia del sistema solar es plasma.

Volvamos al mecanismo de Fermi. Para entender cómo la interacción magnética es capaz de incrementar la energía cinética de una partícula empecemos considerando la siguiente situación. Tomemos un protón en reposo en el espacio interestelar al que se acerca a velocidad v una nube de plasma magnetizado (figura 5). Realicemos ahora un cambio de sistema de referencia y veamos cómo observa ese proceso el observador O' , que se encuentra en reposo respecto a dicha nube (figura 6).

O' observa que un protón a velocidad v se acerca a la nube en reposo y termina penetrando en su interior. Supongamos que en dicho interior existe una configuración de campo magnético



turbulento pero estático, que cambia la dirección del protón de modo aleatorio. Al ser una interacción magnética la velocidad de la partícula no cambiará en valor absoluto, tan solo variará su dirección: en ese sistema de referencia la energía cinética del protón es siempre la misma. Tras varios giros el protón saldrá de la nube por cualquier dirección; supongamos el caso más favorable, en el que la dirección de salida es opuesta a la de entrada (figura 7). Es decir, al abandonar la nube el protón se mueve con la misma velocidad relativa a la nube pero ahora hacia la izquierda en lugar de hacia la derecha.

Si yo pudiera recordar el nombre de todas estas partículas habría sido botánico.

ENRICO FERMI

Si volvemos al sistema de referencia inicial (figura 8), una velocidad hacia la izquierda v relativa a la nube se traduce en una velocidad total $2v$ relativa al observador O, ya que la nube se mueve hacia la izquierda a velocidad v . Es decir, el campo magnético en movimiento de la nube ha sido capaz de transferir energía cinética a un protón inicialmente en reposo.

Analicemos ahora el proceso tal como se da en los remanentes de supernova. Podemos visualizar dicho remanente como una onda de choque de energía inmensa que avanza con una velocidad muy grande, en torno a una centésima parte de la velocidad de la luz, por una región donde hay un plasma magnetizado. Al avanzar, el plasma que queda por detrás del frente de onda (*downstream*) adquiere una velocidad también muy grande, mientras que el plasma que todavía no ha sido perturbado (*upstream*) continúa en reposo (figura 9).

Consideremos un rayo cósmico de energía E que se encuentra en la región *upstream* y supongamos que existe un campo magnético regular paralelo a la dirección en la que avanza el frente de ondas. Ese campo atrapa al rayo cósmico en la zona, en particular, facilita su propagación hacia dicho frente o en la dirección contraria, mientras que los campos magnéticos turbulentos también presentes en esa región cambiarán el sentido de propagación de modo aleatorio. Un ciclo de aceleración se completará cuando el rayo cósmico cruce el frente hasta la región *downstream*, cambie su dirección debido a las turbulencias magnéticas que encuentra, y regrese a la región inicial. El proceso sería similar a una colisión elástica del rayo cósmico con un muro que avanza con una gran inercia a velocidad constante. Si el rayo cósmico es relativista, en cada ciclo ganará en promedio una fracción de energía

$$f = \frac{v_F}{c},$$

Si volvemos al sistema de referencia inicial (figura 8), una velocidad hacia la izquierda v relativa a la nube se traduce en una velocidad total $2v$ relativa al observador O, ya que la nube se mueve hacia la izquierda a

FIG. 7

El protón, con la misma energía cinética que al entrar, sale de la nube por la dirección opuesta a la de entrada.

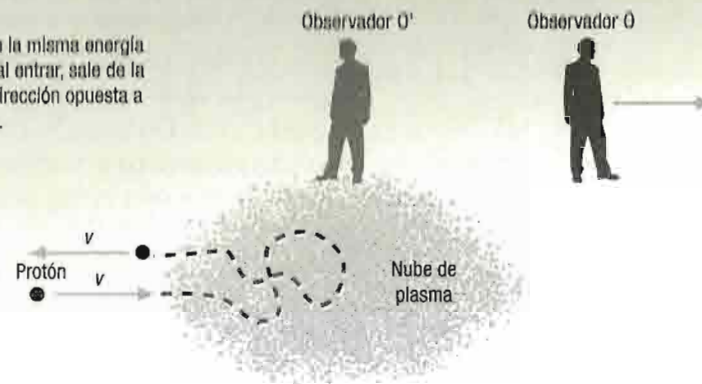
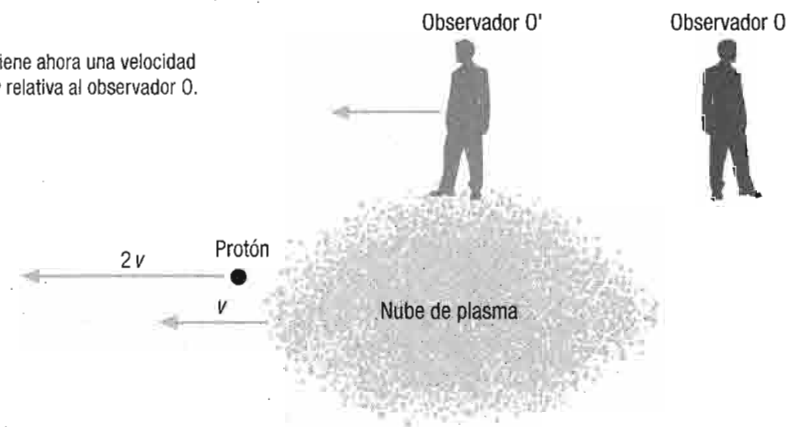


FIG. 8

El protón tiene ahora una velocidad total de $2v$ relativa al observador O.

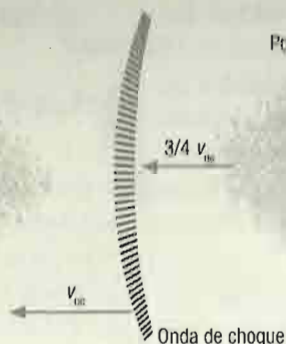


siendo v_F la velocidad del frente de onda y c la de la luz. Es decir, la ganancia de energía que el rayo cósmico experimenta en cada ciclo no depende ni de su carga ni de la intensidad del campo magnético que lo atrapa en la región próxima al remanente, tan solo depende de la velocidad v_F del frente de onda.

Por otro lado, el rayo cósmico tiene una cierta probabilidad de no volver a la región *upstream*, es decir, puede quedarse tras el

Por delante del frente de onda

Por detrás del frente de onda



Onda de choque

La onda de choque avanza a velocidad v_0 y transmite una velocidad en torno al 75 % de la velocidad del frente al plasma magnetizado que queda por detrás de ella.

frente de ondas y no entrar en el siguiente ciclo de aceleración. Esa probabilidad p será mayor cuanto más deprisa se aleje el frente de ondas; a primer orden se obtiene

$$p = \frac{v_F}{c}.$$

Con estos valores de f y p podemos deducir la cantidad de rayos cósmicos de cada energía producidos por el remanente de supernova, obteniéndose una ley de potencias proporcional a

$$E^{\frac{\ln(1-p)}{\ln(1+f)} - 1} = E^{-2}$$

Es decir, obtenemos que los rayos cósmicos son inyectados en el espacio interestelar cercano a los remanentes de supernova con un espectro universal, que no depende ni de su carga, ni de su masa, ni siquiera de la velocidad v_F del frente de onda. El índice espectral $\alpha=2$ que hemos obtenido no coincide con

ENRICO FERMI, EN BUSCA DE LA SENCILLEZ

Nacido en Roma en el año 1901 y premio Nobel de Física a los treinta y siete años, Enrico Fermi ha sido sin ninguna duda uno de los físicos más brillantes e influyentes del siglo XX. Tras la muerte de su hermano cuando tenía catorce años, encontró consuelo en un viejo tratado de física y matemáticas escrito en latín por un padre jesuita, *Elementorum physicae mathematicae*. Ello probablemente marcó su carácter como científico: precoz, autodidacta, enciclopédico, con una intuición excepcional para comprender la estructura matemática de las teorías físicas y sus consecuencias fenomenológicas. Fermi fue un físico extraordinariamente dotado para encontrar siempre el camino más corto, más claro, más simple. Aunque su habilidad matemática era fortísima le desagradaban las cosas innecesariamente complicadas, evitaba realizar cálculos detallados si podía obtener un resultado con argumentos más sencillos. Fue famoso por dar con respuestas rápidas y ajustadas a problemas que requerían meses de trabajo a sus colegas. El método que podríamos llamar de «cálculos en una servilleta de papel» utilizado por los físicos para obtener respuestas aproximadas se conoce hoy como el *método de Fermi*.

La huella de Fermi en la física

Fermi se formó en la prestigiosa Scuola Normale Superiore de Pisa hasta obtener en 1926 una plaza de profesor en La Sapienza de Roma. Aunque es el verdadero padre de la física italiana moderna, huyó a Estados Unidos tras la promulgación de leyes raciales por el gobierno de Benito Mussolini, ya que su mujer Laura Capon era judía. Enrico Fermi murió en Chicago de un cáncer de estómago a los cincuenta y tres años. Además del mecanismo de aceleración de los rayos cósmicos, Fermi tiene numerosas contribuciones fundamentales. Baste decir, como muestra, que el electrón o el protón son fermiones, que el límite de baja energía del modelo estándar se conoce como el *modelo de Fermi*, o que fue él el verdadero artífice científico del programa nuclear estadounidense desarrollado en tiempo récord durante la Segunda Guerra Mundial. El mayor laboratorio de altas energías de su país de adopción lleva el nombre de Fermilab.



Enrico Fermi en la década de 1940.

el medido, más cercano a $\alpha = 2.7$. La supresión adicional de las energías altas se explica por su propagación desde la fuente donde son acelerados hasta la Tierra. Los rayos cósmicos más energéticos son menos desviados por los campos magnéticos que los de energía más baja, por lo que escapan más fácilmente del disco galáctico. Este hecho *penaliza* con un factor de $E^{-0.7}$ su abundancia en el disco, resultando el espectro $E^{-2.7}$ que observamos.

ACELERACIÓN A MUY ALTA ENERGÍA

El mecanismo de aceleración que hemos discutido en la sección anterior de manera muy simplificada representa un gran éxito de la física de rayos cósmicos, pero tiene algunas limitaciones. En primer lugar, para que el ciclo no se interrumpa los rayos cósmicos deben estar atrapados por los campos magnéticos en la región donde se encuentra el frente de onda. Si tenemos en cuenta que el tamaño típico de un remanente de supernova está en torno a 10 pársecs y que el campo magnético podría ser de unos 10 μG , parece difícil que pueda funcionar para protones de energía por encima de 10^6 GeV. Este límite se incrementaría proporcionalmente al número atómico (número de protones en el núcleo) en el caso de los núcleos pesados.

En segundo lugar debe notarse que conforme el remanente de supernova avanza va barriendo una zona donde encuentra gas interestelar. El frente de onda arrastrará ese plasma, y en el proceso irá perdiendo energía. Al cabo de unos mil años la zona barrida contiene una masa similar a las 10 masas solares eyectadas en la explosión de la supernova, por lo que el frente de ondas perderá velocidad y dejará de ser un acelerador de rayos cósmicos efectivo. La cuestión pasa a ser entonces cuántos ciclos ha podido realizar un rayo cósmico durante esos mil años. Se puede ver que la duración de cada ciclo es proporcional a la energía del rayo cósmico e inversamente proporcional a su carga; un cálculo detallado muestra que es poco probable que un protón pueda ir más allá de los 10^6 GeV.

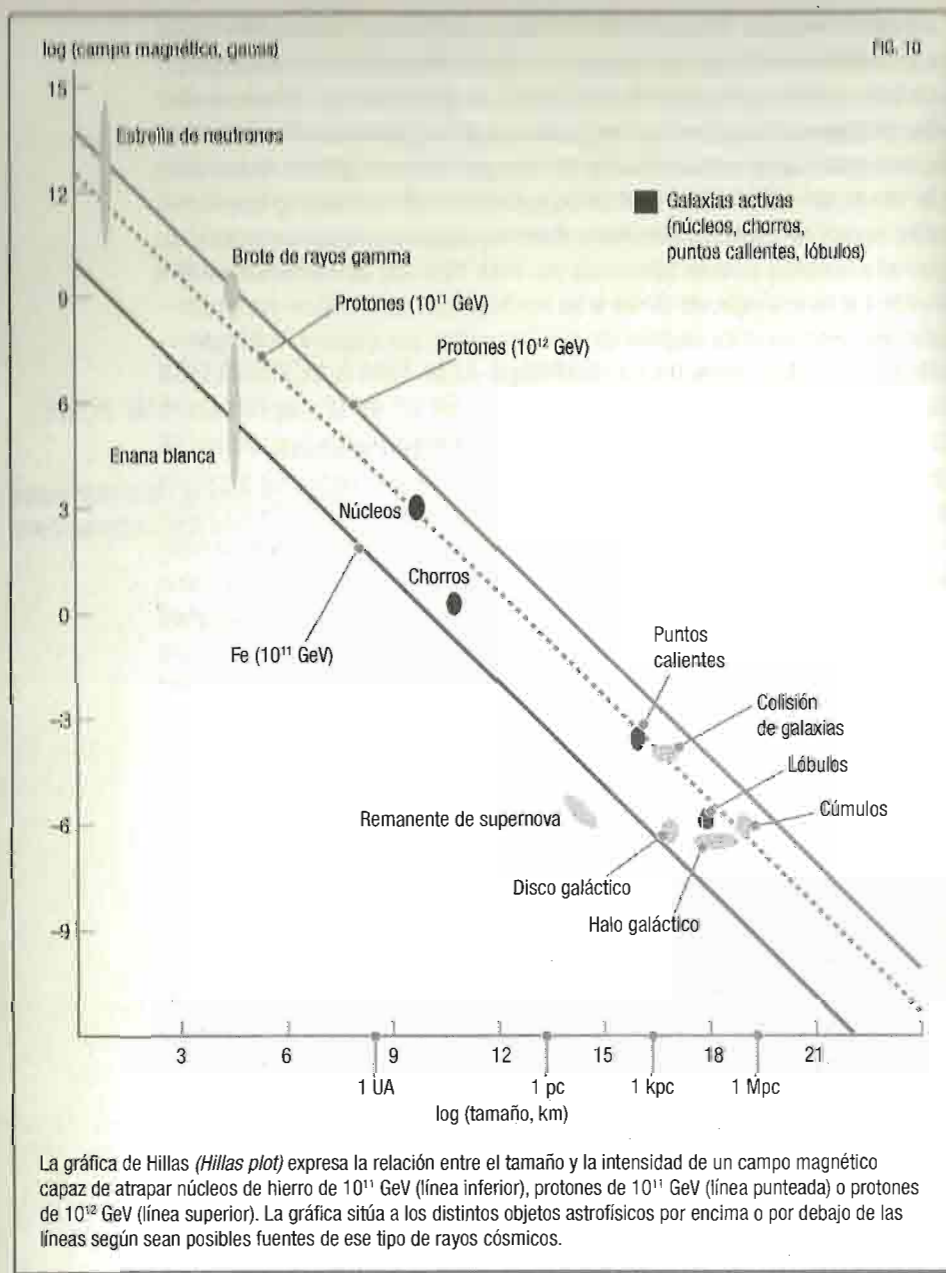
Por último, es interesante señalar que el mecanismo descrito puede acelerar a cualquier partícula cargada, en particular, también electrones. El número neto de electrones (número de electrones menos positrones) en cualquier plasma cósmico debe ser igual al de protones, de modo que su carga total sea nula. Un electrón es 2000 veces más ligero que un protón o un neutrón, y esa diferencia de masa condicionará la máxima energía que el electrón puede alcanzar en este tipo de aceleradores. El límite en la energía se debe a la acción de los campos magnéticos presentes en la región de aceleración, los cuales «obligan» a las partículas cargadas a describir las trayectorias helicoidales descritas en el primer capítulo. El giro que experimenta una partícula cargada al propagarse en el seno de un campo magnético induce la emisión de una luz característica conocida como *radiación sincrotrón*. Pues bien, a una misma energía esa luz es más intensa cuanto más ligera sea la partícula en movimiento, en concreto, es 4 millones de veces más intensa para el electrón que para el protón. Como consecuencia, puede estimarse que cuando un electrón de 10^5 GeV realiza un nuevo ciclo de aceleración en un remanente de supernova su pérdida de energía por emisión sincrotrón es similar a la energía ganada en el ciclo. Por tanto, no parece factible acelerar electrones más allá de esos 10^5 GeV.

Todo indica que los remanentes de supernova ofrecen una explicación convincente a los rayos cósmicos de energía por debajo de la *rodilla* del espectro a $10^{6.5}$ GeV (véase la figura 1, pág. 83). ¿Qué otra explicación encontramos para los rayos cósmicos de mayor energía?

Parece claro que para poder acelerar un rayo cósmico mediante campos magnéticos se requiere que estos sean capaces de curvar significativamente su trayectoria. Es decir, el campo debe atraparlo para que el ciclo de aceleración pueda repetirse muchas veces o, al menos, debe ser capaz de invertir el sentido de su marcha para poder producir un *rebote* en el que el rayo cósmi-

Es un error capital teorizar antes de tener datos.

SHERLOCK HOLMES, PERSONAJE CREADO
POR ARTHUR CONAN DOYLE



co gane energía. La curvatura que produce un campo magnético es menor cuanto mayor sea la energía del rayo cósmico sobre el que actúa, pero aumenta proporcionalmente a la intensidad del campo. Por tanto, para que un ciclo de aceleración pueda completarse el campo magnético debe ser o suficientemente intenso o suficientemente extenso, ya que una menor intensidad puede compensarse con un mayor tamaño. Un interesante análisis del británico Michael Hillas publicado en 1984 revela dónde debemos buscar a los posibles candidatos (figura 10). La «gráfica de Hillas» muestra el tamaño mínimo que debe tener un campo magnético de cierta intensidad para poder confinar núcleos de hierro de 10^{11} GeV o protones de 10^{11} y 10^{12} GeV. Al tener mayor carga, el hierro requiere campos magnéticos menos extensos para quedar atrapado. Por ejemplo, un remanente de supernova, con un campo de 10 microgauss en una región de 10 pc de radio, es incapaz de atrapar un núcleo de hierro de esa energía. Sin embargo, un cúmulo de galaxias sería capaz de atrapar el hierro y también el protón usando un campo magnético diez veces más débil extendido en una región mil veces más grande. Dos objetos astrofísicos que destacan en la gráfica de Hillas son las estrellas de neutrones y las galaxias con núcleo activo; veamos qué posibilidades ofrecen.

FUENTES PUNTUALES: ESTRELLAS DE NEUTRONES Y PÚLSARES

Los rayos cósmicos pueden ser acelerados hasta altísimas energías por objetos astrofísicos de pequeño tamaño si su campo magnético es muy intenso, tal como ilustra la gráfica de Hillas. Una estrella de neutrones es lo que queda tras el colapso y la consiguiente explosión de una estrella muy masiva. Se encontraría por tanto en el interior del remanente de supernova descrito anteriormente. Como su nombre indica, está formada por neutrones, y su densidad es inmensa: alrededor de 1,5 masas solares comprimidas en un objeto de unos 10 km de radio.

Una estrella como el Sol gira a un ritmo de una vuelta cada 30 días. Si la comprimiésemos hasta el tamaño de una estrella

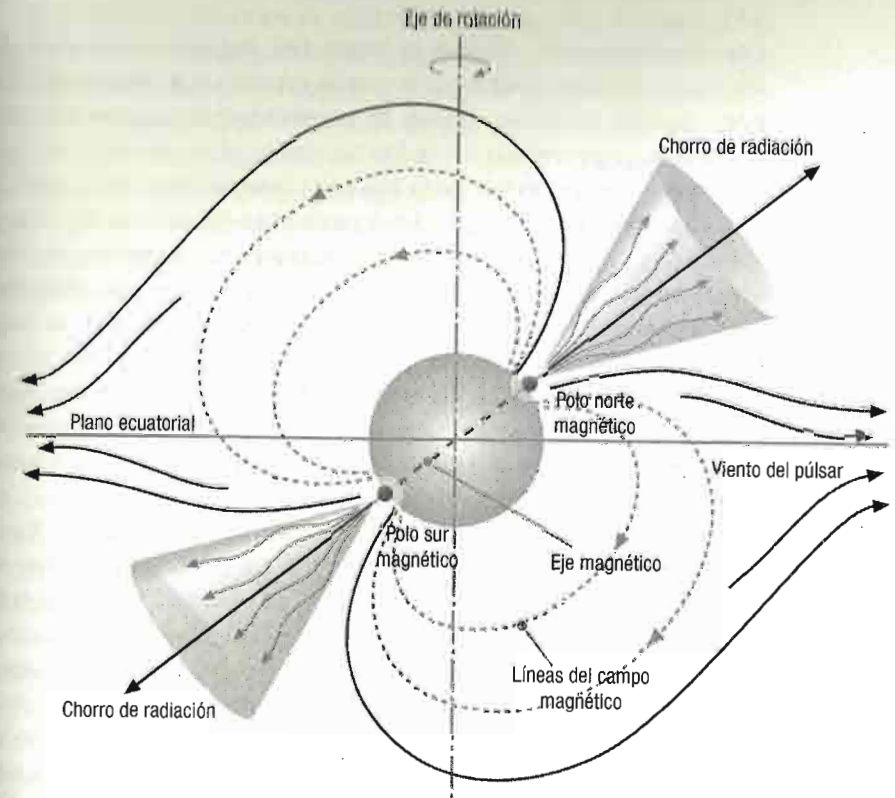
de neutrones su velocidad angular aumentaría, del mismo modo que un patinador que gira sobre sí mismo con los brazos extendidos aumenta su velocidad de giro cuando los junta. Por tanto, no es de extrañar que estas diminutas estrellas de neutrones puedan girar dando mil vueltas por segundo. Un púlsar consiste precisamente en eso: una estrella de neutrones rotando vertiginosamente (figura 11).

La estrella gira alrededor de un eje que no coincide con su eje magnético, lo que se traduce en la emisión de haces de radiación por los polos. Al girar, esos haces van cambiando de dirección tal como lo haría la luz emitida por un faro. Si la Tierra está en la zona barrida por el haz se detectarán *pulsos* de luz de alta frecuencia a intervalos muy cortos y regulares, de ahí el nombre de púlsar (*pulsating radio star*). El primer púlsar fue observado en 1967 por los británicos Jocelyn Bell Burnell y Antony Hewish, quienes llamaron LGM-1 (por las siglas en inglés de *little green men*, hombrecillos verdes) a la señal detectada. El pulso tiene una periodicidad de entre una milésima y unos pocos segundos; aunque es casi tan regular como los relojes atómicos más precisos, hoy sabemos que no es ninguna señal de vida inteligente. Se estima que la estrella de neutrones tarda alrededor de un millón de años en perder velocidad de giro debido a la emisión de luz.

El campo magnético en una estrella de neutrones es intensísimo, billones de veces más fuerte que el terrestre. El hecho de que el eje magnético esté rotando rápidamente induce poderosísimos campos eléctricos, generándose diferencias de potencial del orden de 10^9 voltios. Para hacernos una idea de lo que eso significa, baste decir que un metro cúbico del campo electromagnético en el púlsar del Cangrejo contiene más energía que la que los humanos hemos conseguido generar en centrales nucleares, hidráulicas y térmicas durante los últimos 100 años.

Los protones y los electrones presentes en el entorno de la estrella se verán acelerados por los campos magnéticos en movimiento del púlsar. En particular, observamos rayos gamma (fotones) con energías cercanas a 10^3 GeV procedentes de los púlsares. Como veremos en detalle más adelante, la aparición de

FIG. 11



Esquema de un púlsar. La luz en radiofrecuencia es emitida en la dirección de los polos magnéticos, que a su vez dan del orden de 1 000 vueltas por segundo alrededor del eje de rotación.

fotones indica que ese entorno es denso: los electrones en proceso de aceleración chocan con partículas en el medio y producen fotones y pares electrón-positrón a través de los procesos discutidos en el primer capítulo. Los púlsares galácticos son, por tanto, fuentes de antielectrones, así como potenciales aceleradores de los rayos cósmicos hasta el *tobillo* del espectro de rayos cósmicos a $10^{9.5}$ GeV.

LA ACELERACIÓN DE RAYOS CÓSMICOS EN GALAXIAS CON NÚCLEO ACTIVO

Consideremos por último la parte del espectro más allá de 10^{10} GeV, los conocidos como rayos cósmicos ultraenergéticos o de energía ultraalta. Existe la posibilidad de que esos rayos cósmicos hayan sido acelerados mediante el mecanismo cíclico discutido anteriormente pero usando plasmas en movimiento de tamaño mucho mayor que los remanentes de supernova: halos galácticos e incluso cúmulos de galaxias. Es también posible, sin embargo, que la aceleración que los lleva hasta esas energías se haya producido mediante un mecanismo que incluya un solo «empujón», lo que debería ocurrir en objetos astrofísicos con campos magnéticos muy intensos y variables, capaces de inducir campos eléctricos extremos. Entre estos últimos, el candidato favorito lo encarnan los núcleos activos de galaxias: quásares, blázares y galaxias de Seyfert.

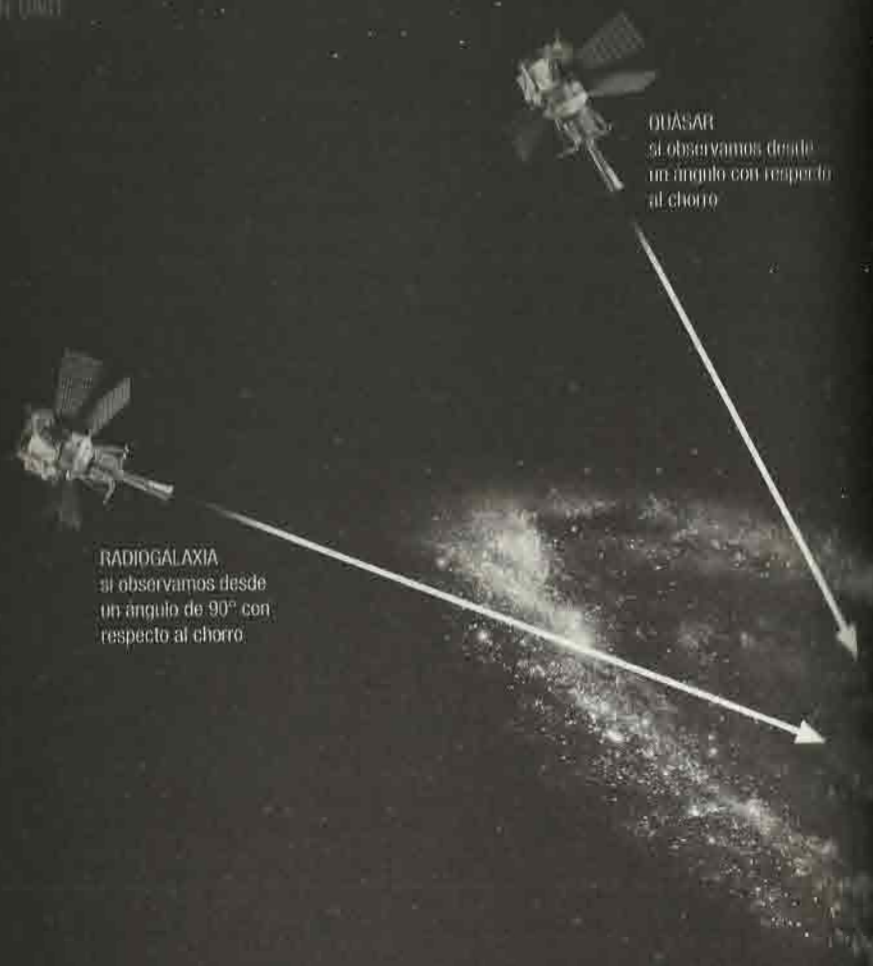
Los quásares (del inglés *quasi-stellar radio sources*) son fuentes de radiofrecuencia aparentemente puntuales descubiertas en la década de 1950. Hoy sabemos que, en realidad, son la región compacta en el centro de las llamadas galaxias con núcleo *activo* (véase la imagen de las págs. 106-107). Se denominan así aquellas galaxias que emiten una fracción significativa de radiación electromagnética a través de fuentes que no son las usuales, es decir, de estrellas o de polvo y gas interestelar. Los quásares son extremadamente luminosos, más que mil millones de estrellas de la galaxia que los contiene juntas, y también extremadamente lejanos. Este último punto, su lejanía, resulta interesante: si el universo es homogéneo e isótropo, ¿por qué no observamos ningún quásar en las galaxias vecinas? La razón es que, más que en el espacio, la lejanía de los quásares es temporal. El universo de hace varios miles de millones de años reunía mejores condiciones que el actual para la formación de núcleos activos en las galaxias. En consecuencia, lo que realmente estamos observando son quásares que seguramente se extinguieron hace ya mucho tiempo, pero cuya luz alcanza ahora la Tierra por estar a miles de millones de años-luz de distancia. Es muy probable que nuestras

galaxias vecinas o la misma Vía Láctea hayan albergado uno de estos núcleos activos en el pasado.

El quásar se forma en el centro de galaxias que contienen un agujero negro supermasivo, millones de veces más pesado que el Sol. Al caer hacia el centro, el gas de la galaxia gana energía cinética y aumenta su velocidad de giro, formándose un *disco de acreción*. El calentamiento por fricción de todo ese material produce un plasma y campos magnéticos intensísimos; aunque una fracción de gas termine cayendo al agujero negro, otras partículas son aceleradas hacia afuera, formando chorros perpendiculares al disco. Dependiendo de la perspectiva de observación desde la Tierra, ese conjunto de fenómenos puede ofrecer aspectos muy diferentes (véase la imagen de las págs. 106-107). Se cree que cuando el agujero negro consume toda la materia en su vecindad el núcleo galáctico deja de emitir grandes cantidades de energía y la galaxia pasa a una fase no activa similar a la que observamos en nuestra Vía Láctea.

Los chorros de partículas en los quásares tienen unas dimensiones transversales en torno al pársec y campos magnéticos del orden de $1 \mu\text{G}$, por lo que según el criterio de Hillas podrían acelerar a los rayos cósmicos a través de ciclos difusivos hasta energías de alrededor de 10^{11} GeV. Por otro lado, en la región central del núcleo los campos magnéticos son mucho más intensos y variables, por lo que el método de un solo empujón podría también incrementar muchísimo la energía de un rayo cósmico. En concreto, se observan campos del orden de $1\,000\text{ G}$ actuando sobre una región de 10^{-5} pc, lo que también podría llevar a un protón hasta los 10^{11} GeV.

Como norma general, la aceleración en la región central parece más factible para protones que para núcleos pesados, ya que estos últimos tienden a disociarse al chocar con la gran cantidad de luz de alta frecuencia presente en la zona. En contraste, los procesos difusivos que podrían darse en el frente de onda de los chorros favorecerían la aceleración de núcleos pesados como el hierro, ya que la densidad de luz en esta región es menor y la mayor carga eléctrica de los núcleos hace que puedan ser atrapados más fuertemente que los protones por los campos magnéticos.

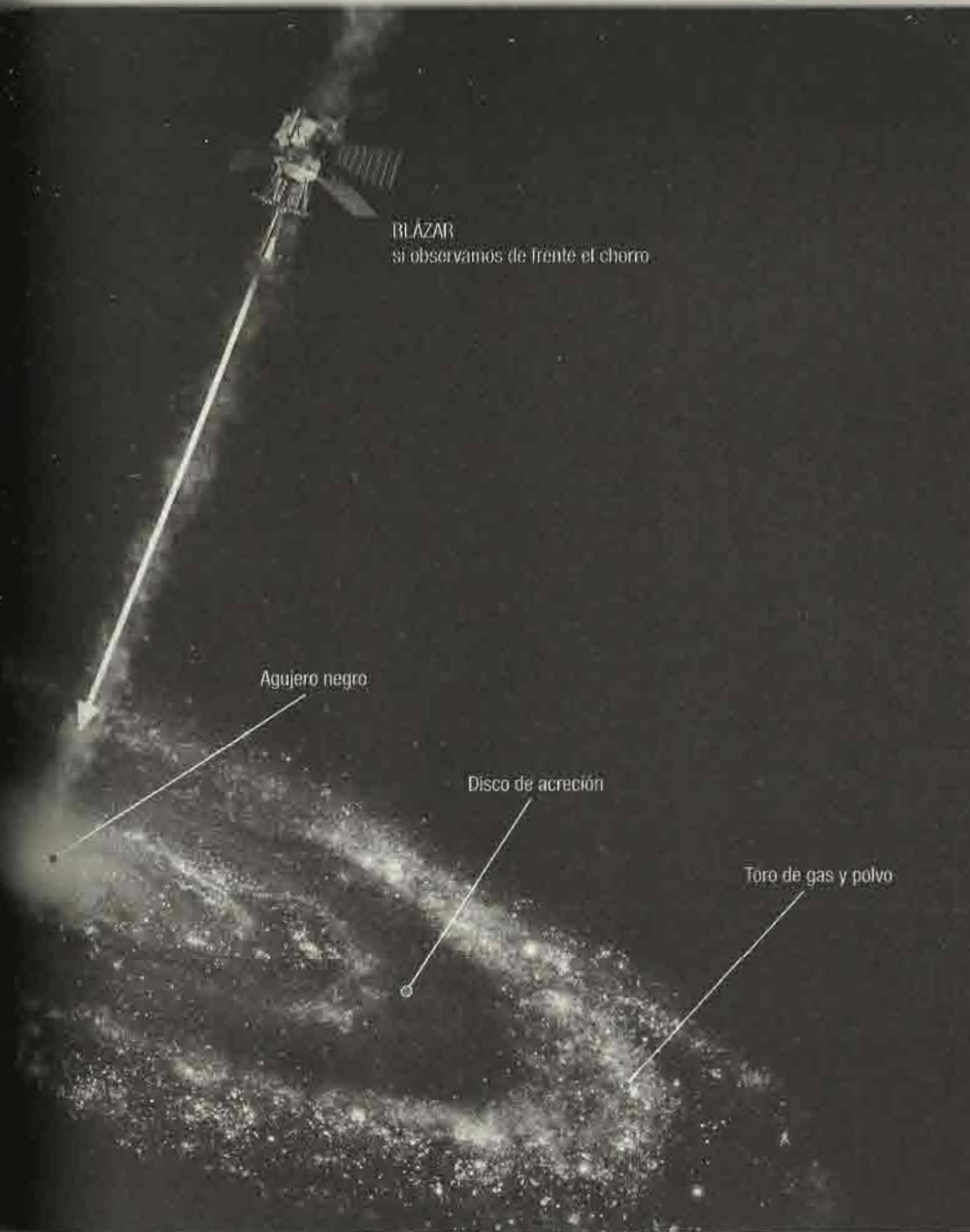


RADIOGALAXIA
si observamos desde
un ángulo de 90° con
respecto al chorro

QUÁSAR
si observamos desde
un ángulo con respecto
al chorro

Núcleo activo de galaxia: contiene un agujero negro supermasivo, un disco de acreción, un toro de gas y polvo, y chorros de partículas perpendiculares al disco. Se cree que dependiendo del ángulo de visión se observa un quásar, un blázar o una radiogalaxia (galaxia muy brillante en frecuencias de ondas de radio).

Chorro de partículas con fuerte
emisión de ondas de radio



BLÁZAR
si observamos de frente el chorro

Agujero negro

Disco de acreción

Toro de gas y polvo

Podemos concluir que, aunque es todavía mucho lo que desconocemos sobre los aceleradores cósmicos, emerge un esquema básico en el que los remanentes de supernovas y los núcleos activos de galaxias jugarían un papel protagonista. La confirmación de dicho esquema requerirá trabajo de investigación en varios frentes. En primer lugar, se precisa ampliar la información astrofísica sobre las posibles fuentes y sus entornos, ya que dicha información es necesaria para deducir la extensión y la intensidad de los campos magnéticos o la densidad de polvo y gas. En segundo lugar, es preciso determinar con mayor precisión la composición de los rayos cósmicos. En particular, hay dos regiones de energía que parecen clave: en torno a la *rodilla* del espectro a 10^6 GeV y también a energías ultraaltas, por encima de 10^9 GeV. No es descabellado pensar que la primera región podría llegar a observarse directamente en el espacio, mientras que la región de mayor energía requerirá detectores de superficie más precisos que los actuales. Por último, un aspecto que sin duda será clave para resolver el misterio es el desarrollo de la astronomía de las astropartículas neutras: los telescopios de rayos gamma y de neutrinos podrían ofrecer posibilidades todavía insospechadas.

Astropartículas neutras

Al no verse afectados por los campos magnéticos presentes en el medio interestelar, los neutrinos y los rayos gamma «apuntan» a sus fuentes. Estos últimos ofrecen una imagen del cosmos complementaria a la que brinda la luz en cualquier frecuencia, mientras que los neutrinos son capaces de revelar los secretos guardados en el interior de las estrellas o en el mismo centro de las galaxias.

A diferencia de los rayos cósmicos cargados, las astropartículas neutras no pueden acelerarse hasta altas energías mediante campos electromagnéticos. Los fotones producidos en el interior de las estrellas exhiben un espectro térmico, con energías similares a la temperatura en la superficie. Sin embargo, esas energías son siempre relativamente bajas: las estrellas más calientes del universo son las llamadas protoestrellas de neutrones, el remanente estelar que resulta tras la explosión de una supernova, y su temperatura no sobrepasa los 50 MeV. Los neutrinos, por otro lado, también se producen muy abundantemente en estrellas como nuestro Sol, aunque no con un espectro térmico. Aparecen como resultado de las reacciones de fusión nuclear que se dan en la estrella, abandonándola con una energía típica que alcanza hasta unos pocos MeV. Alrededor del 2% de la radiación emitida por el Sol lo es en forma de neutrinos, llegando un flujo a la Tierra de unos 60 000 millones de neutrinos solares por centímetro cuadrado y segundo. Esos neutrinos atraviesan nuestro cuerpo y la Tierra sin dejar apenas rastro. La fracción de energía emitida en forma de neutrinos es aún mucho mayor durante la explosión de una supernova: el

99% de la energía expulsada al espacio exterior es transportada por neutrinos de hasta unos 100 MeV.

A pesar de que la energía de los fotones y los neutrinos procedentes de las estrellas está siempre por debajo de 1 GeV, durante las últimas décadas hemos sido capaces de detectar rayos gamma con una energía de miles de GeV y neutrinos con hasta varios millones de GeV. ¿Cómo alcanzan las astropartículas neutras esas energías? Pues bien, fotones y neutrinos son «hijos» de los rayos cósmicos cargados de energía ligeramente superior. Más precisamente, los rayos gamma pueden tener un origen leptónico o hadrónico, mientras que los neutrinos de alta energía son todos ellos hadrónicos. Veamos qué significa eso.

Las zonas próximas a los aceleradores cósmicos, como los remanentes de supernova, los púlsares o los quásares, son zonas densas, y los rayos cósmicos cargados se encuentran atrapados por los campos magnéticos en esa zona durante todo el proceso de aceleración. Durante ese tiempo tienen una cierta probabilidad de chocar con otras partículas del medio, lo que hará que se produzcan partículas secundarias de similar energía, entre ellas fotones y neutrinos. La denominación hadrónica o leptónica se refiere a si el rayo cósmico inicial del que procede dicho fotón o neutrino es un protón (es decir, un hadrón) o un electrón (un leptón).

La producción hadrónica se da, en primer lugar, cuando un protón de alta energía choca con otro protón en reposo. En el proceso puede aparecer cualquier hadrón secundario, pero los más frecuentes son un barión principal (protón o neutrón) y una multiplicidad de piones neutros y cargados con aproximadamente la misma frecuencia:

$$p + p \rightarrow p, n, \pi^+, \pi^-, \pi^0$$

Los protones producidos continuarán atrapados por los campos magnéticos presentes en la zona de la colisión, pero el resto de partículas o bien pueden escapar por ser neutras (el neutrón) o bien se desintegran dando lugar a una nueva generación de partículas que

sí conseguirán escapar. El neutrón, en particular, tiene en reposo una vida media de 15 minutos, pero cuando su energía es de 10 000 GeV su tiempo de vida se dilata hasta 100 días, lo que puede ser suficiente para escapar de la región de mayor densidad y campo magnético más intenso. Pasado ese tiempo se desintegra en

$$n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e.$$

Es decir, cada neutrón creado como partícula secundaria da lugar a un antineutrino electrónico. Los piones se desintegrarán en la misma zona de aceleración, resultando

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu \nu_\mu,$$

donde hemos incluido la desintegración del muon positivo en un positrón y dos neutrinos. Análogamente tenemos

$$\pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu \bar{\nu}_\mu.$$

Por último, los piones neutros dan dos fotones:

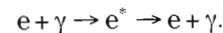
$$\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma.$$

Es decir, en la colisión de un protón de alta energía con otro en reposo se crean piones neutros y cargados que, al desintegrarse, generan fotones y neutrinos. La producción hadrónica de astropartículas neutras también puede obtenerse a través de la colisión de un protón de alta energía con la radiación electromagnética ambiente:



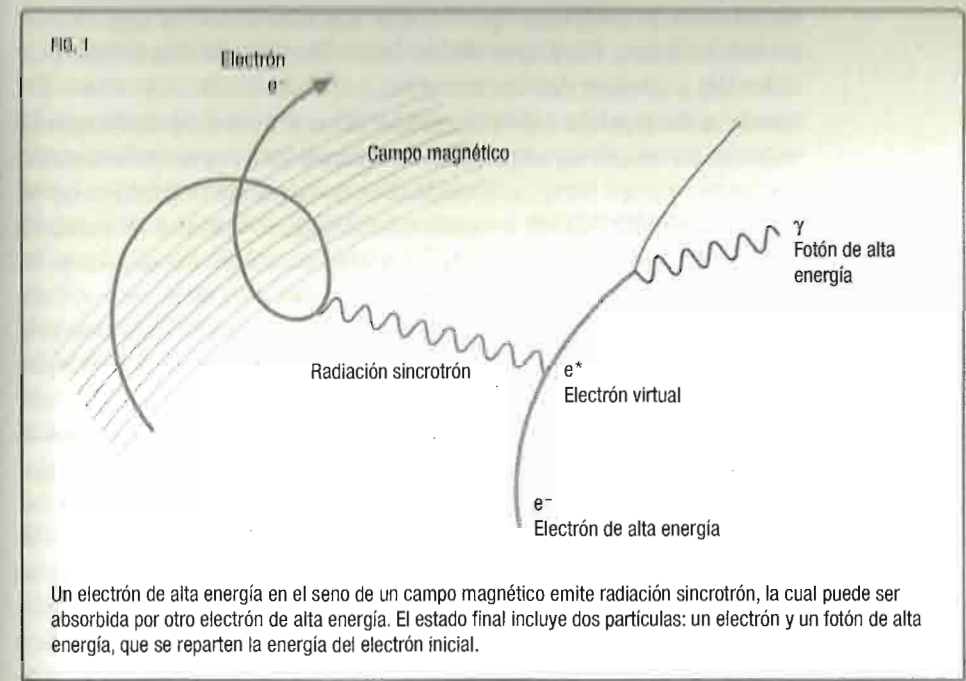
La subsiguiente desintegración de los piones o del neutrón producirá fotones y neutrinos. La partícula o *resonancia hadrónica* Δ^+ que aparece en estas reacciones puede considerarse un mediador entre el estado inicial y el final, y para que el proceso sea efectivo (*resonante*) es necesario que el fotón aporte cierta cantidad de energía a la colisión. Por ejemplo, si la energía del protón incidente es de 10^8 GeV, el fotón debe tener una frecuencia igual o mayor que la de la luz visible o la reacción será incapaz de generar la resonancia Δ^+ .

En cuanto al posible origen leptónico de los rayos gamma, se da en las interacciones de los electrones con los campos electromagnéticos presentes en el lugar de aceleración. Es importante señalar que los electrones de alta energía son ellos mismos una fuente de radiación electromagnética. La razón es que sus giros en el seno del campo magnético que los atrapa inducen la emisión de radiación sincrotrón, con un espectro que va desde el infrarrojo hasta los rayos X. Tal como discutíamos en el primer capítulo, cuando el electrón absorbe uno de esos fotones pasa a un estado virtual excitado, que al decaer produce un fotón de energía similar a la del electrón. El proceso neto, conocido como *colisión de Compton inversa*, consiste por tanto en el choque de un electrón de alta energía con un fotón poco energético (posiblemente procedente de la radiación sincrotrón emitida por otro electrón de alta energía) dando como estado final un electrón y un fotón de alta energía:



La presencia de electrones de alta energía en el acelerador cósmico prácticamente garantiza la emisión de rayos gamma (figura 1).

Por tanto, las astropartículas neutras de alta energía son, básicamente, partículas secundarias que indican la posición de los



aceleradores de los rayos cósmicos cargados. Todos los procesos que hemos discutido pueden también ocurrir en el medio interestelar o en el intergaláctico, lejos de las fuentes. Sin embargo, esos medios son menos densos, por lo que la frecuencia de las colisiones y la producción de fotones y neutrinos es menor que en las proximidades de los lugares de aceleración. Las colisiones de los rayos cósmicos cargados con el medio interestelar dan lugar a un fondo difuso de rayos gamma sobre el que se distingue la posición de las fuentes o de las regiones densas.

ASTRONOMÍA CON RAYOS GAMMA Y NEUTRINOS

Una diferencia fundamental entre fotones y neutrinos es su distinta probabilidad de interactuar con la materia. Por ejemplo, cuando un fotón es creado en el centro del Sol choca con los

electrones y protones que le rodean tras recorrer aproximadamente 1 cm. Para que dicho fotón llegue a la superficie por difusión y escape deben transcurrir muchos miles de años. En cambio, un neutrino de energía inferior a 1 GeV abandonará la estrella en un par de segundos sin apenas inmutarse: solo uno de

He hecho una cosa terrible, acabo de postular una partícula que no puede ser detectada.

WOLFGANG PAULI, SOBRE EL NEUTRINO

cada diez mil neutrinos creados en el centro del Sol choca con la materia que encuentra antes de alcanzar la superficie y abandonarlo.

Esta diferencia explicaría una primera razón por la cual la astronomía con neutrinos es una posibilidad de gran interés: con ellos podemos llegar a ver el interior de los objetos astrofísicos, no solo su superficie. Por otro lado, ese argumento también indica que en general será muy difícil detectarlos: la gran mayoría de los neutrinos cruzarán nuestro detector sin dejar rastro. Para observar una señal necesitamos monitorizar una gran cantidad de materia, de modo que unos pocos de los miles de millones de neutrinos que la atraviesan puedan chocar. Hoy sabemos que aunque difícil ello no es imposible, puesto que numerosos experimentos han observado los neutrinos procedentes del Sol o los producidos en los reactores de las centrales nucleares. En 1987 varios experimentos dedicados a la observación de neutrinos solares registraron, de modo inesperado, una señal procedente de una explosión de supernova. Se trata de SN1987A, la supernova más próxima a la Tierra desde la observada por Kepler en 1604. La señal incluía un total de 24 sucesos contabilizados durante 13 segundos por tres observatorios localizados en Japón, Estados Unidos y Rusia. El pulso de neutrinos tuvo lugar dos horas antes de la llegada de la señal luminosa, lo que se entiende ya que los neutrinos escapan más fácilmente que la luz visible del lugar de la explosión. Estas observaciones se consideran el inicio de la astronomía de neutrinos, y encajan con las estimaciones discutidas en el capítulo 2: el 99% de la energía gravitatoria liberada en el colapso de una supernova lo es en forma de neutrinos.

Otra interesante característica del neutrino como mensajero cósmico es que se propaga sin chocar a través de nubes den-

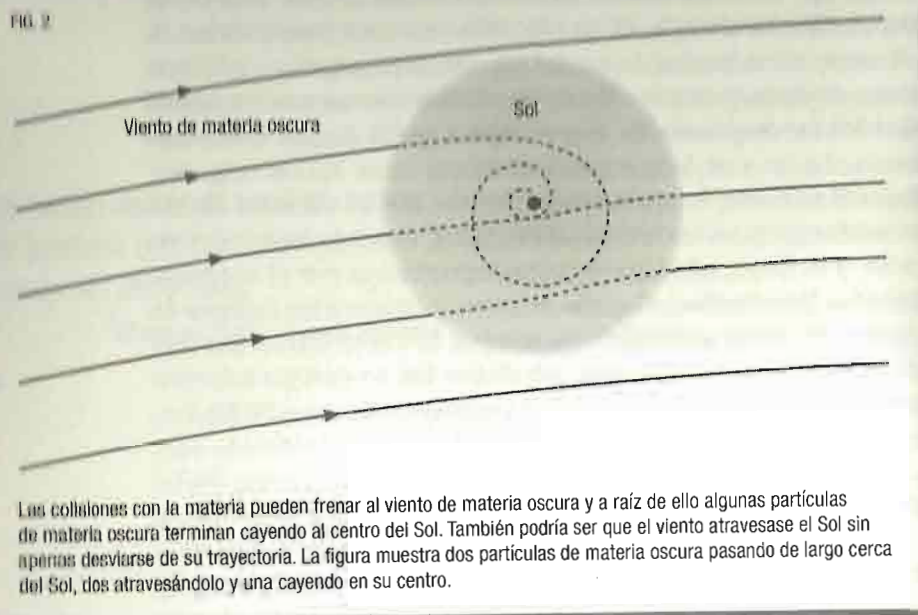
sas de gas o de inmensas distancias intergalácticas. Los rayos gamma de alta energía, en cambio, tienen cierta probabilidad de chocar con los fondos de luz del espacio intergaláctico y formar pares electrón-positrón. Es decir, el universo se vuelve opaco para los rayos gamma de alta energía a partir de una cierta distancia. La luz con la que pueden chocar tiene varios orígenes. Específicamente, los principales fondos son el cósmico de microondas producido durante el Big Bang, el fondo isotrópico de radio, y el de luz visible e infrarroja producida por el conjunto de todas las estrellas. A causa de estas colisiones los fotones de energía en torno a 10^6 GeV no pueden recorrer distancias mucho mayores que 0,1 Mpc, mientras que los de energía superior a 10^9 GeV están limitados a desplazamientos de unos 50 Mpc.

BÚSQUEDA DE MATERIA OSCURA EN EL CENTRO DEL SOL

Un ejemplo de las posibilidades que ofrecen los neutrinos se da en la búsqueda de materia oscura. Esta es una misteriosa sustancia que constituye aproximadamente el 83% de toda la materia del universo. Interacciona muy débilmente con la materia ordinaria, por lo que es invisible al ojo humano y a los telescopios de cualquier tipo. En los modelos de materia oscura más usuales la partícula que la constituye es muy pesada, en torno a cien veces más pesada que el protón, y se distribuye por toda la galaxia de modo diluido: no hay moléculas, piedras o planetas de materia oscura, sino un gas que se extiende por todo el halo galáctico.

La materia oscura no tiene por qué girar como lo hace nuestro disco galáctico, por lo que es de esperar que el sistema solar se desplace respecto al gas de materia oscura con una velocidad similar a los 220 km/s que tiene respecto al centro galáctico. Es decir, desde el sistema de referencia en el que el Sol está en reposo, se observaría un viento de materia oscura con una velocidad media cercana a esos 220 km/s (figura 2).

Es posible que, al penetrar en el Sol, el viento sea total o parcialmente atrapado. Ello dependerá de cuán frecuentes sean las colisiones de las partículas de materia oscura con los pro-



tones, electrones y neutrones que encuentre en su camino. Es decir, todavía ignoramos cuáles son exactamente las propiedades de una partícula de materia oscura: también podría ser que el viento atravesase el Sol sin apenas desviarse de su trayectoria. Pero si estas misteriosas partículas de materia oscura chocan con la materia ordinaria que forma el Sol con relativa frecuencia, algunas de ellas reducirán su velocidad debido a esas colisiones y terminarán cayendo al centro solar por la acción de la gravedad.

Conforme el Sol barre una distancia mayor, la materia oscura se irá acumulando en su centro, lo que favorecerá que las partículas se encuentren con antipartículas de materia oscura también atrapadas en el centro de nuestra estrella. Se producirán entonces procesos de aniquilación partícula-antipartícula que pueden dar como resultado neutrinos de alta energía. Esos neutrinos podrían escapar del Sol y alcanzar la Tierra. Telescopios de neutrinos como IceCube o ANTARES (*Astronomy Neutrino*

Telescope and Abyss environmental RESearch) buscan una señal de este tipo procedente del Sol.

IMAGEN DEL CIELO EN RAYOS GAMMA

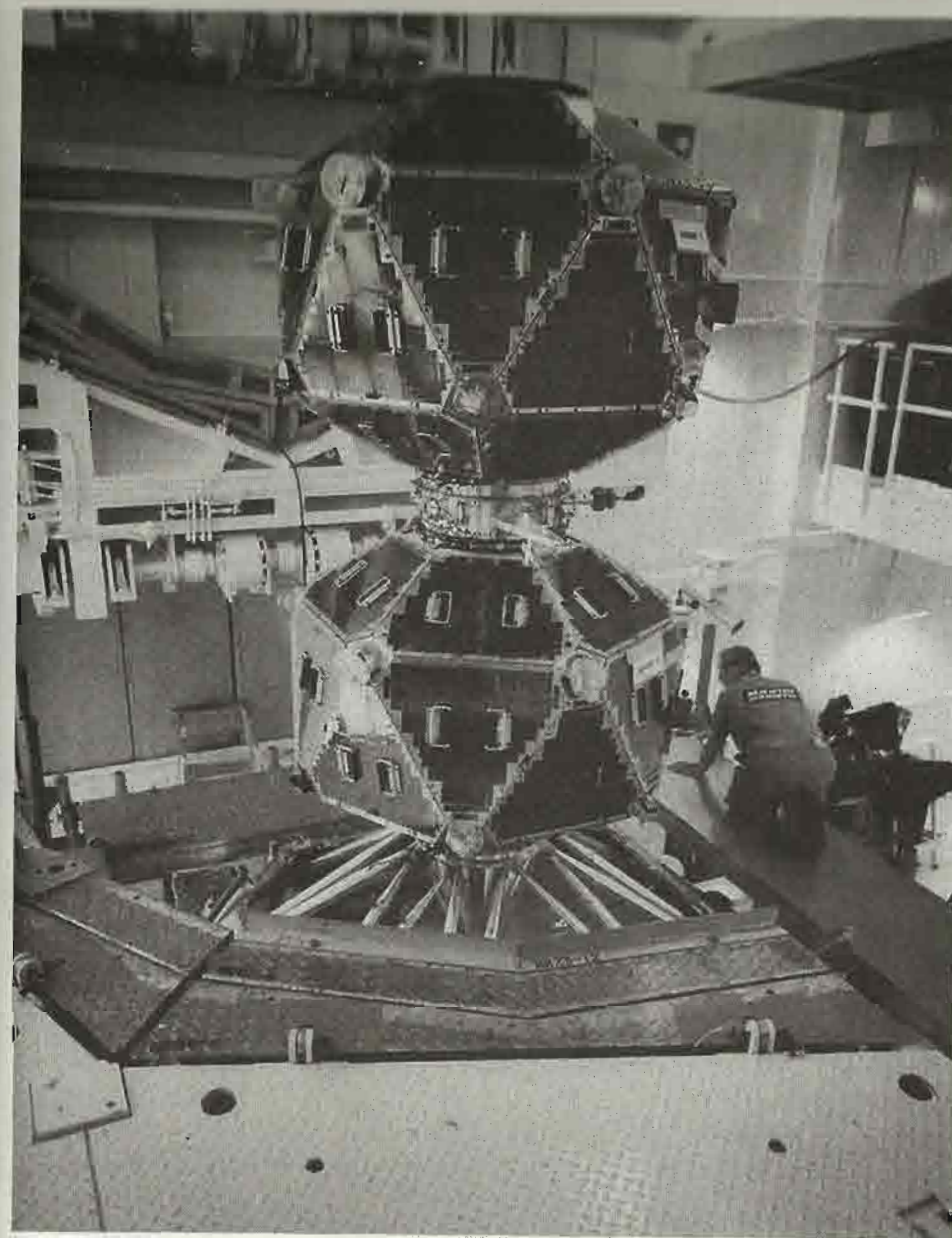
Al llegar a la Tierra, los rayos gamma son absorbidos por la alta atmósfera. Por tanto, los telescopios donde se detectan individualmente mediante técnicas parecidas a las usadas en colisionadores, deben instalarse en satélites. Sin embargo, cuando la energía del fotón primario está por encima de 50 GeV pueden también usarse telescopios de rayos gamma con base en el suelo. Esta segunda técnica es capaz de captar la luz producida por la cascada electromagnética que se forma en la atmósfera y distinguirla de la producida por una cascada hadrónica iniciada por un protón o un núcleo atómico.

Los experimentos en satélites se iniciaron en el año 1961 con un detector ubicado en la nave orbital Explorer 11, mientras que los telescopios de rayos gamma instalados en el suelo se desarrollaron durante la década de 1990. De hecho, fue la tecnología militar lo que impulsó los estudios en el campo de la astronomía de rayos gamma durante la década de 1970. Los detectores en los doce satélites estadounidenses VELA (véase la fotografía de la pág. 121) fueron diseñados para ver *flashes* de fotones procedentes de detonaciones nucleares soviéticas, ante la sospecha de que se estaban violando los acuerdos que prohibían ese tipo de pruebas. Sin embargo, lo que descubrieron estos satélites fue *brotes de rayos gamma* procedentes del espacio profundo. Esos misteriosos destellos, con una duración de entre un segundo a varios minutos, ocurren (afortunadamente) en otras galaxias, y probablemente tienen su origen en explosiones de *hipernova* en las que el remanente estelar es un agujero negro en lugar de una estrella de neutrones. En cualquier caso, tanto la técnica de detección de rayos gamma en satélites como la de telescopios en el suelo han resultado ser extraordinariamente fructíferas, haciendo posible el descubrimiento de numerosas fuentes.

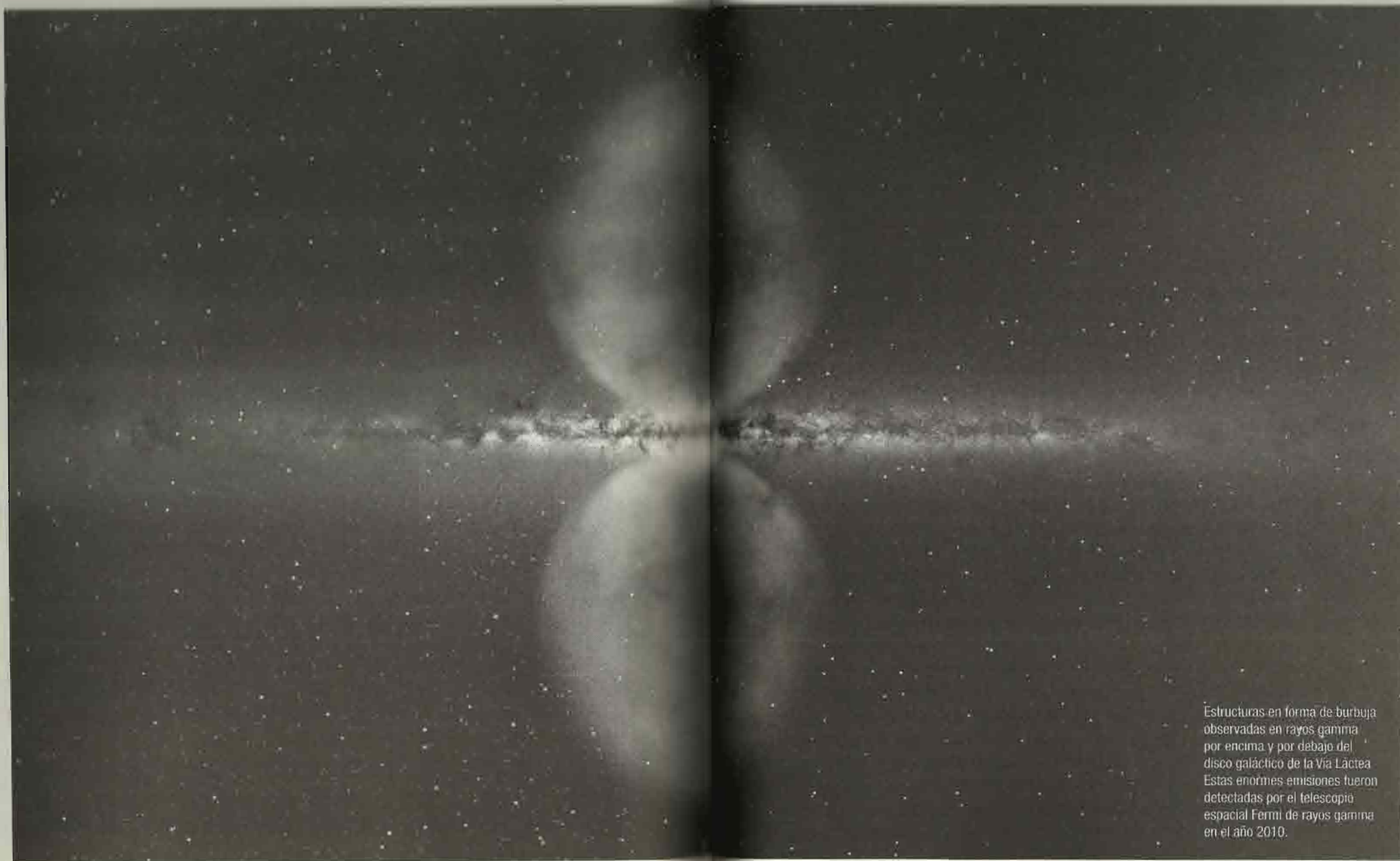
La astronomía de rayos gamma también nos ha ayudado a entender mejor la estructura de nuestra galaxia. Por ejemplo, en el año 2010, el telescopio LAT (*Large Area Telescope*) en el satélite Fermi detectó dos inmensas *burbujas* con emisión de gran cantidad de rayos gamma por encima y por debajo de nuestro disco galáctico (véase la imagen de las págs. 122-123). Fue un descubrimiento inesperado, ya que en realidad se estaban buscando fotones procedentes de la aniquilación de materia oscura en el centro galáctico. La zona donde están las burbujas detectadas por el Fermi ya había sido señalada en 2004 por el observatorio WMAP (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*), que detectó una bruma con emisión anómala de luz en la frecuencia de las microondas. Todo indica que ambas observaciones tienen un origen común: la gran cantidad de electrones de alta energía presentes en la zona. Por un lado, al trazar espirales en el seno de los campos magnéticos los electrones emiten la radiación sincrotrón detectada por WMAP; por otro lado, cuando absorben esa radiación sincrotrón la reemiten como rayos gamma de alta energía, lo que correspondería a la detección realizada por el Fermi.

Se cree que los electrones causantes de las burbujas del Fermi proceden de una emisión violenta producida hace algunos millones de años en las cercanías del inmenso agujero negro (con cuatro millones de masas solares) que hay en el centro de nuestra galaxia. La simetría de las dos burbujas respecto al centro galáctico sugiere que fueron creadas en un suceso breve, posiblemente una explosión en la que dos chorros de altísima energía escaparon por los polos del agujero negro. Alguna cosa muy masiva, al caer hacia el centro, habría inyectado la energía gravitatoria necesaria para formar esos chorros y arrastrar el plasma interestelar en esa zona del disco galáctico hasta formar las burbujas, de manera análoga a como al soplar con una pajita se forman burbujas en un líquido. Todo indica que el núcleo de la Vía Láctea, aunque profundamente dormido, tiene periodos en los que ronca.

Los remanentes de supernova son una fuente de rayos gamma observable tanto desde satélites como desde los telescopios en el suelo. Los rayos gamma más energéticos a menudo no proceden directamente del remanente sino de alguna nube con alta



Dos satélites Vela durante los preparativos para su lanzamiento al espacio en mayo de 1969.



Estructuras en forma de burbuja observadas en rayos gamma por encima y por debajo del disco galáctico de la Vía Láctea. Estas enormes emisiones fueron detectadas por el telescopio espacial Fermi de rayos gamma en el año 2010.

densidad de gas cercana al mismo, lo que revelaría su origen hadrónico. Es decir, su origen sería un rayo cósmico cargado que tras ser acelerado en el remanente atraviesa una zona 100 veces más densa que el medio interestelar y choca con un protón de esa zona, se rompe y da piones neutros, que a su vez decaen en los fotones de alta energía que observamos.

Telescopios de rayos gamma en el suelo como HESS (*High Energy Stereoscopic System*) en Namibia o MAGIC (*Major Atmospheric Gamma Imaging Cherenkov*) en las islas Canarias (España) han observado los fotones de mayor energía. En particular, se detectan rayos gamma de hasta 20 TeV procedentes de núcleos activos de galaxias lejanas. En nuestra galaxia, púlsares, remanentes de supernova y nubes con alta densidad de gas son las fuentes astrofísicas más frecuentes.

NEUTRINOS DE ALTA ENERGÍA

Muy probablemente los neutrinos nos depararán en un futuro inmediato los progresos más significativos que vayan a darse en el campo de la física de partículas. Esta expectativa está motivada, en primer lugar, por el hecho de que son el sector menos conocido del llamado *modelo estándar*, con algunos aspectos fundamentales todavía por esclarecer. Por ejemplo, aunque sabemos desde la década de 1990 que su masa no es nula, como lo es la del fotón, no sabemos si el origen de esa masa es electrodébil o si nos está revelando una nueva escala de energía. Los neutrinos aparecen en tres sabores como compañeros de los tres leptones cargados, el electrón, el muon y el tau, pero son muchísimo más ligeros que estos: al menos un millón de veces más ligeros que el electrón o mil millones de veces más ligeros que el leptón tau. Por tanto, sospechamos que su masa no se origina a través de interacciones directas con el *bosón de Higgs*, como ocurre con los leptones cargados, sino que aparece a través de su mezcla con campos intermediarios muy masivos, lo que irónicamente los hace a ellos tan ligeros.

Desde un punto de vista experimental, la gran cantidad y variedad de datos sobre las propiedades de los neutrinos que se

EL CHERENKOV TELESCOPE ARRAY (CTA)

CTA es uno de los grandes proyectos de física de astropartículas programados para la próxima década, con la participación de unos 1.200 científicos de 200 instituciones en 32 países. Estará formado por dos observatorios de rayos gamma, uno en cada hemisferio terrestre. Tras analizar las distintas candidaturas, en el año 2015 se decidió la ubicación de CTA-Norte en Roque de los Muchachos (a 2396 m de altitud en la isla canaria de La Palma, España) y de CTA-Sur en Paranal (a 2635 m de altitud, en el desierto de Atacama, Chile).

Recepción «en estéreo»

En cada observatorio se instalará una «granja» de telescopios de distinto diámetro: grande (23 m), mediano (12 m) y pequeño (4 m). La combinación de varios tamaños permitirá la observación de rayos gamma con energías desde 20 GeV hasta unos 300 TeV. La detección de los primeros precisa de la sensibilidad alcanzada en los telescopios grandes (4 telescopios en cada observatorio); mientras que los rayos gamma más energéticos, al ser muy poco frecuentes, requieren una red extensa de pequeños telescopios que cubran una gran región del cielo (se instalará un total de 100 telescopios en CTA-Sur y 19 en CTA-Norte). Además de un mayor volumen de datos, la observación de un mismo suceso en estéreo con varios telescopios simultáneamente permitirá una mejor determinación de la energía y la dirección del primario, así como una más precisa separación de las cascadas atmosféricas producidas por rayos gamma de las iniciadas por protones y núcleos atómicos. CTA se basará en la experiencia acumulada durante los últimos años en observatorios como MAGIC y HESS, y garantiza que la astronomía de rayos gamma jugará un papel protagonista durante las próximas décadas.



Fotomontaje de la red de telescopios proyectada para CTA-Norte, con un total de 19 telescopios entre grandes, medianos y pequeños, distribuidos sobre una superficie de 1 km².

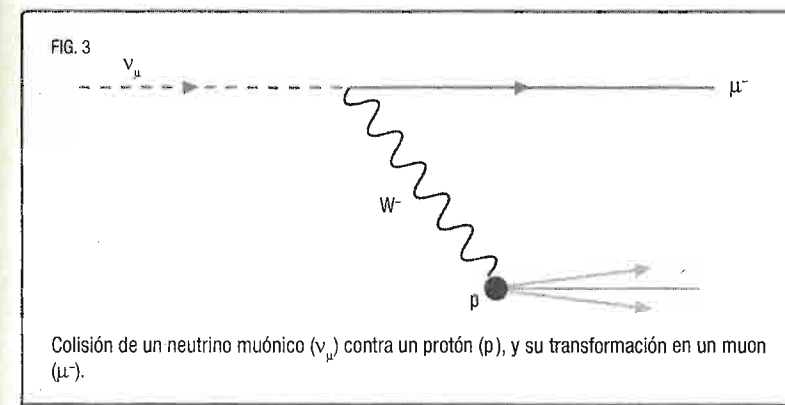
esperan para la próxima década invita al optimismo. Existen programados decenas de experimentos de física nuclear (NEXT —*Neutrino Experiment with a Xenon TPC*— en España), experimentos con neutrinos procedentes de reactores (Daya Bay en China), con neutrinos atmosféricos (INO —*India based Neutrino Observatory*—), o con haces de neutrinos producidos en aceleradores (DUNE —*Deep Underground Neutrino Experiment*—, que observará en la mina de Homestake neutrinos producidos a 1300 km, en el Fermilab de Chicago). Asimismo, la próxima generación de experimentos de cosmología basados en tierra (JPAS —*Javalambre Physics of the Accelerated Universe Astrophysical Survey*— en España) o en el espacio (el satélite Euclid, de la Agencia Espacial Europea) podría ofrecer datos muy interesantes para la física de neutrinos, ya que estos intervienen en el proceso de formación de grandes estructuras como galaxias o cúmulos de galaxias.

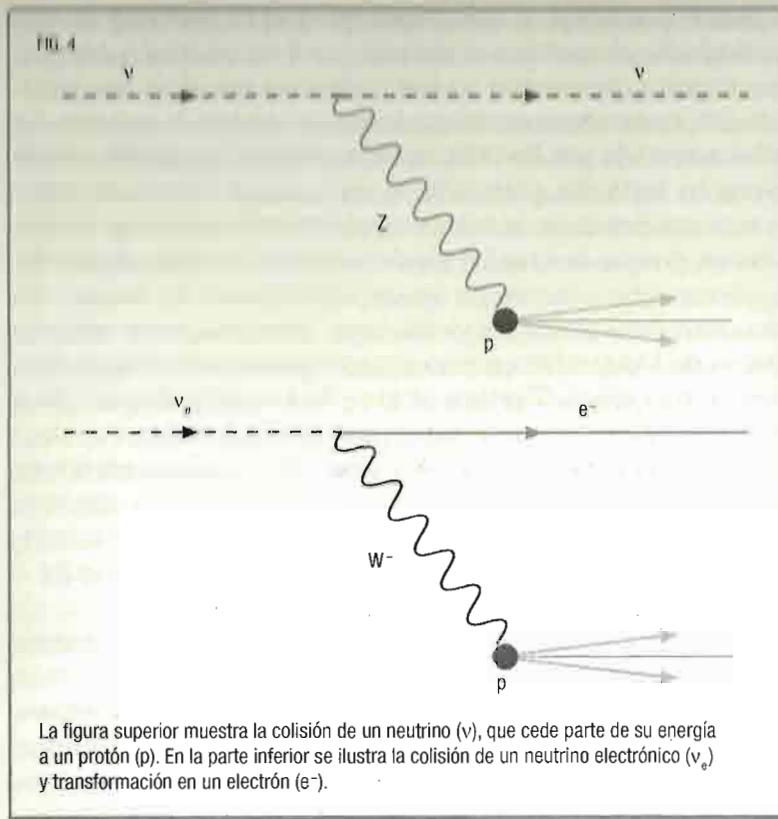
En ese contexto, los neutrinos cósmicos de alta energía jugarán también un papel protagonista. Los telescopios de neutrinos actualmente en marcha o en proceso de construcción aprovechan grandes volúmenes de hielo o de agua para detectar deposiciones de energía realizadas por los neutrinos al chocar con la materia. Dicha energía produce la llamada *luz Cherenkov*, que se propaga cientos de metros en el medio hasta llegar a los detectores. En particular, IceCube, localizado a una profundidad de más de 2 km bajo el hielo de la Antártida, consta de 86 cables verticales a los que se han fijado detectores de luz que cubren un volumen total de 1 km³ de hielo de gran pureza. Los neutrinos pueden alcanzar el detector desde cualquier dirección, también desde direcciones ascendentes tras atravesar toda la Tierra. En ese tipo de sucesos ascendentes, de hecho, está garantizado que el origen de la señal es un neutrino, puesto que ninguna otra partícula conocida es capaz de atravesar la Tierra desde las antípodas sin ser antes absorbida.

Cuando un neutrino entra en el detector y choca con el hielo pueden producirse dos tipos de sucesos, dependiendo de si la interacción está mediada por un bosón neutro Z o por uno cargado W⁻. En ambos casos el neutrino cederá parte de su energía

al protón o neutrón al que golpea, pero si el mediador es una partícula W⁻ el neutrino se transformará en un leptón cargado (un electrón, un muon o un tau), mientras que si es una partícula Z el neutrino no cambiará de naturaleza tras la colisión. La señal detectada por IceCube incluye siempre la energía cedida al protón, toda ella absorbida en unos pocos metros de hielo, pero dependiendo de la naturaleza del leptón emergente tras la colisión el resto de la señal puede ser de varios tipos claramente diferenciados: la energía de ese leptón puede ser totalmente invisible, o bien puede ser visible pero absorbida en unos pocos metros de hielo, o bien puede generar una traza de varios kilómetros de longitud. El primer caso se dará cuando el leptón final es un neutrino de cualquier sabor; el segundo cuando es un electrón o un leptón tau, y el tercero corresponde a un suceso donde se ha generado un muon. Los muones de alta energía son muy penetrantes, capaces de atravesar varios kilómetros de hielo ionizando la materia que encuentran a su paso. En las figuras 3 y 4 mostramos ejemplos de sucesos con o sin muon.

En la figura 3, un neutrino muónico (ν_μ) choca con un protón (p) y se transforma en un muon (μ^-), el cual genera una traza que atraviesa horizontalmente el detector. El bosón W⁻ interviene como mediador. En la parte superior de la figura 4, un neutrino (ν) de cualquier sabor choca y cede parte de su energía a un protón y continúa su marcha. El bosón Z interviene como mediador.





En la parte inferior de la figura 4, un neutrino electrónico (ν_e) choca y se transforma en un electrón (e^-). El bosón W^- interviene como mediador. En ambos casos, la energía es absorbida cerca del lugar de la colisión, lo que define un suceso de *tipo burbuja*: una burbuja de luz de la que no emerge la traza característica producida por un muon.

Hasta el año 2013, los telescopios de neutrinos de alta energía habían observado tan solo neutrinos atmosféricos, que aparecen como partículas secundarias en el interior de las cascadas atmosféricas creadas por los rayos cósmicos cargados. Una característica importante de esos neutrinos es que su espectro en la región de energía por encima de 10^5 GeV está muy

suprimido, ya que los piones de los que proceden tienden a chocar con el aire antes de decaer. IceCube ha conseguido durante los últimos años acceder a esas altísimas energías, y los datos obtenidos han sido extraordinariamente interesantes. Hasta el momento ha detectado 37 sucesos, tres de ellos por encima de 10^6 GeV = 1 PeV. Su análisis ha demostrado que estos sucesos no son atmosféricos, es decir, IceCube ha descubierto un flujo de neutrinos astrofísicos de origen todavía desconocido. En los próximos años se abordará una ampliación del volumen de detección en IceCube, al tiempo que se desarrollará un gran telescopio (KM3NeT) en las profundidades del Mediterráneo (véanse las imágenes de la pág. 133). Como resultado, los neutrinos de alta energía irán definiendo una imagen del cielo seguramente muy distinta a la obtenida con cualquier otro mensajero cósmico.

RAYOS CÓSMICOS ULTRAENERGÉTICOS Y NEUTRINOS COSMOGÉNICOS

Se denominan así los rayos cósmicos cargados que poseen una energía por encima de 10^9 GeV. En la actualidad son detectados por los llamados observatorios híbridos, que utilizan simultáneamente las dos técnicas que han venido usándose en experimentos anteriores: detectores en superficie que registran la señal de las partículas cargadas que alcanzan el suelo y detectores de la luz de fluorescencia producida por la interacción de los miles de millones de partículas secundarias en el interior de la cascada con el nitrógeno atmosférico. Los dos experimentos más representativos hoy en funcionamiento son el observatorio Pierre Auger en Argentina y el Telescope Array en Utah, Estados Unidos.

Una consecuencia interesante de la presencia de este tipo de rayos cósmicos ultraenergéticos es que sugiere la existencia de neutrinos de también altísima energía, conocidos como *neutrinos cosmogénicos*. El efecto que los produce fue descrito en 1966 de modo independiente por el estadounidense Kenneth

LA MASA DEL ELECTRÓN Y LA DEL NEUTRINO

Las partículas elementales del llamado modelo estándar adquieren su masa a través de interacciones con el vacío. Contra lo que uno podría suponer, el vacío no es lo mismo que la nada, sino que se trata de un concepto mucho más rico y de gran interés en física. El vacío viene a ser lo que queda cuando quitamos todo lo que podemos quitar; en el lenguaje más preciso de la física lo definiremos como el estado de mínima energía.

El Higgs y la masa de algunas partículas

El modelo estándar es una teoría cuántica de campos; cada partícula o interacción (el electrón, el fotón, el bosón de Higgs) viene descrita por un campo. En el campo encontramos configuraciones clásicas y también fluctuaciones cuánticas, las cuales dan lugar a las partículas elementales. En ausencia de fuentes la configuración clásica de la mayoría de campos es el cero, del mismo modo que cuando eliminamos todas las cargas eléctricas el campo de Coulomb se hace nulo. Pues bien, el campo de Higgs es una especie de campo de Coulomb que llena todo el espacio con un valor no nulo incluso cuando no hay partículas que lo generen: el campo de Higgs toma un valor $v = 246$ GeV en el vacío. Al propagarse, las partículas que se acoplan al Higgs interactúan con ese vacío, experimentando una resistencia al movimiento que define precisamente su masa (figura 1). Cuanto mayor sea el acople y de una partícula al bosón de Higgs, mayor será su masa m : $m = yv$. Es decir, la masa es proporcional al valor del Higgs en el vacío y a un acople que será distinto para cada partícula. El electrón, el bosón Z o el quark top adquieren su masa de esa manera, pero creemos que no ocurre lo mismo con el neutrino. La masa del neutrino sería mucho más pequeña que todas las demás debido a que al interactuar con el vacío se transforma en otra partícula N de masa M muy grande. M define una nueva escala en física de partículas que está muy por encima de la escala *electrodébil* definida por el valor v del campo de Higgs en el vacío. Al ser tan pesada, la partícula que se forma durante la propagación del neutrino es *virtual*, vive un tiempo inversamente proporcional a su masa y tras interactuar de nuevo con el vacío vuelve a transformarse en un neutrino estándar (figura 2). La masa que adquiere el neutrino sería por tanto

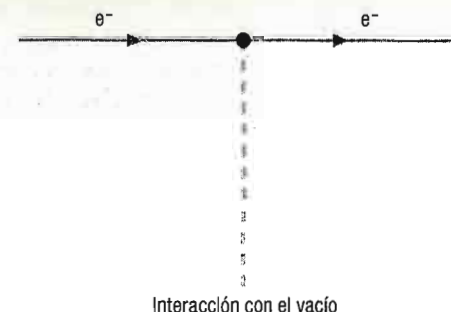
$$m_\nu = \frac{m^2}{M},$$

ecuación que expresa que cuanto mayor es la masa M del llamado *neutrino estéril* N , menor es la masa m_ν del neutrino estándar ν . El esquema presentado es conocido como *mecanismo del balanceo* (*see-saw mechanism*), ya que cuando la masa M sube, la masa m_ν del neutrino estándar baja, y sugiere la existencia de nueva física a energías en torno a $M = 10^{10}$ GeV. Fue propuesto simultáneamente por el estadounidense Murray Gell-Mann, junto con sus colaboradores Pierre Ramond y Richard Slansky, y por el japonés Tutomu Yanagida en el año 1979.

¿Un nuevo proceso nuclear?

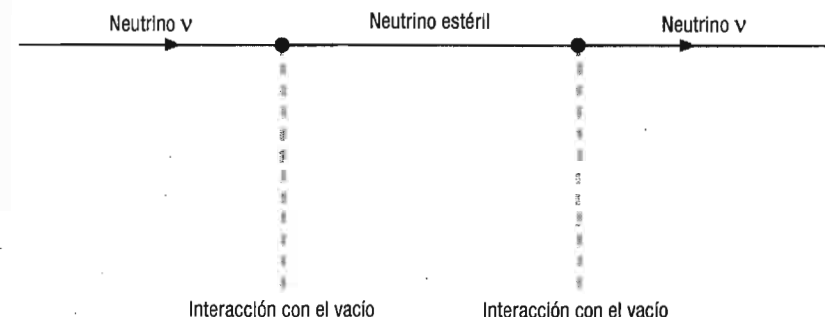
Una consecuencia de que los neutrinos adquieran su masa a través de ese mecanismo es que aparecería un nuevo proceso nuclear conocido como doble desintegración beta sin neutrinos. Si una desintegración beta es la conversión en el interior de un núcleo de un neutrón en un protón, un electrón y un antineutrino, el proceso referido consistiría en la conversión de dos neutrones en dos protones y dos electrones sin que aparezca ningún neutrino. En la actualidad existen varios experimentos dedicados a la búsqueda de ese tipo de procesos nucleares.

FIG. 1



Un electrón adquiere su masa a través de una interacción con el campo de Higgs en el vacío.

FIG. 2

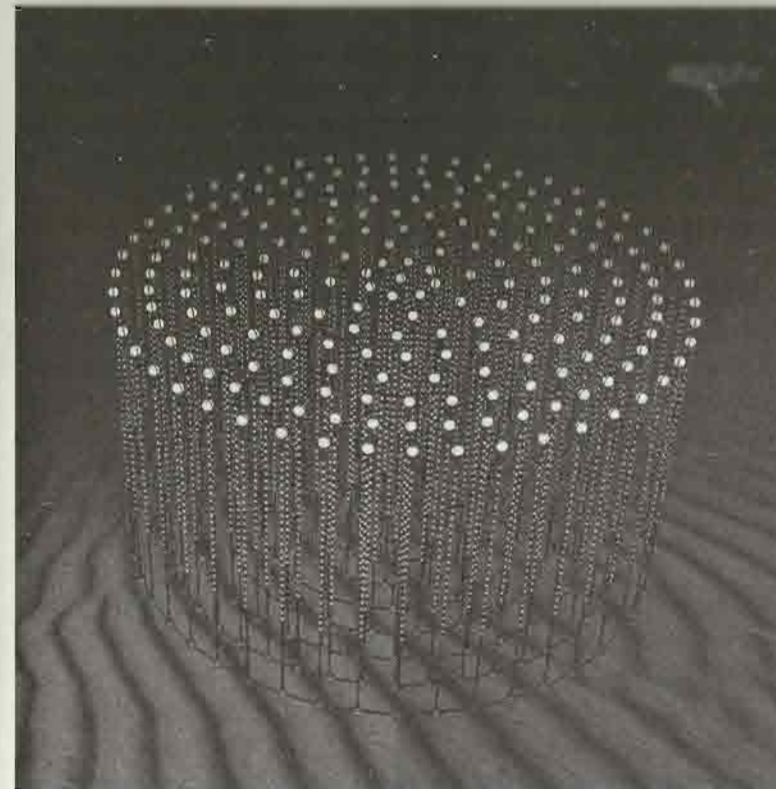


Un neutrino adquiere su masa a través de un neutrino estéril virtual de masa muy grande.

Greisen y los soviéticos Vadim Kuzmin y Georgiy Zatsepin, por lo que se conoce como *efecto GZK*. Veamos en qué consiste.

Observamos que los rayos cósmicos de energía superior a 10^{10} GeV llegan a la Tierra con una frecuencia de unas pocas partículas por kilómetro cuadrado y año, aunque no sabemos exactamente ni cuándo ni dónde han sido aceleradas. Un estudio de su propagación, sin embargo, nos ofrece algunos indicios. Al viajar por el espacio intergaláctico los rayos cósmicos no se encuentran un vacío absoluto, sino un fondo de radiación electromagnética con una temperatura de 2,7 K que se conoce como fondo de microondas o CMB (*Cosmic Microwave Background*). Esa luz, en cierto modo el «eco» del Big Bang, estuvo a una temperatura mucho mayor hace unos 13800 millones de años, pero se fue enfriando debido a la expansión del universo. La energía promedio de los fotones que la forman es hoy minúscula, de tan solo $1,2 \cdot 10^{-3}$ eV, por lo que las colisiones *elásticas* de cualquier partícula con los fotones del CMB apenas alteran su trayectoria ni le restan energía. Curiosamente, cuando la partícula incidente tiene una energía desmesurada, como ocurre con los rayos cósmicos ultraenergéticos, las colisiones con el fondo de microondas pueden tener mayores consecuencias. Supongamos que el rayo cósmico es un protón de 10^{11} GeV, energía inmensa frente a la de un fotón del fondo con $2 \cdot 10^{-3}$ eV = $2 \cdot 10^{-12}$ GeV. Para entender lo que ocurre cuando el protón y el fotón chocan, es útil cambiar de sistema de referencia, y preguntarnos qué observa alguien que se mueve exactamente con la misma velocidad que el protón, es decir, un observador para el que el protón está en reposo. Pues bien, verá que el fotón de la radiación de fondo se acerca al protón en reposo con una energía aumentada por un factor 10^{11} , lo que daría un valor en torno a 0,2 GeV. Lo que ocurre en la colisión de un protón en reposo y un fotón de 0,2 GeV ya ha sido descrito anteriormente; a esas energías el protón absorbe el fotón, se transforma en una resonancia Δ^+ y se desintegra en un protón o un neutrón más un pión:

$$p + \gamma \rightarrow \Delta^+ \rightarrow p + \pi^0, n + \pi^+.$$



Arriba, ilustración de la posible configuración final de los cables verticales submarinos con módulos ópticos digitales en el proyecto KM3NeT. El telescopio de neutrinos operará a gran profundidad en el fondo del mar Mediterráneo y tendrá un volumen instrumentado de varios kilómetros cúbicos. A la izquierda, prototipo del módulo óptico digital que se usará en el telescopio de neutrinos del proyecto KM3NeT. Cada módulo contiene tubos fotomultiplicadores alojados dentro de la esfera de vidrio de 43 cm. La parte frontal de cada tubo está rodeada por un anillo concentrador de luz para incrementar el área de captación de luz. El módulo contiene asimismo sensores de calibración y electrónica varía.

Si ahora volvemos al sistema de referencia original vemos que el protón inicial ha producido un protón o neutrón secundario que mantiene aproximadamente un 90% de la energía inicial, y que el 10% restante es adquirido por el pion creado en la colisión. Es decir, cuando un protón de 10^{11} GeV se propaga por el espacio intergaláctico tiende a chocar inelásticamente con los fotones del fondo de microondas, perdiendo un 10% de su energía en cada colisión.

Un cálculo más preciso muestra que la energía crítica a partir de la cual los protones experimentan ese tipo de colisiones es $E_{\text{GZK}} = 5 \cdot 10^{10}$ GeV. La distancia característica que deben recorrer para experimentar alrededor de 10 colisiones es 30 Mpc. En consecuencia, cualquier protón con una energía superior a E_{GZK} debe provenir de una fuente a una distancia inferior a esos 30 Mpc.

Para apreciar el significado de dicha distancia, podemos mencionar que las 25 llamadas *galaxias satélite* de la Vía Láctea se encuentran en promedio a 0,11 Mpc. La galaxia grande —similar a la nuestra— más cercana sería Andrómeda, situada a 0,78 Mpc, mientras que nuestro Grupo Local de galaxias —el cúmulo al que pertenecemos— tiene un tamaño de unos pocos Mpc. Esos 30 Mpc corresponderían a distancias en el interior del supercúmulo donde nos encontramos, bautizado recientemente como Laniakea, el cual contiene un total de 100 000 galaxias en una esfera de 160 Mpc de diámetro. Teniendo en cuenta que el diámetro del universo accesible desde la Tierra es de 28 000 Mpc, los rayos cósmicos de energía en torno a E_{GZK} deben ser producidos relativamente cerca de donde nos encontramos.

Es importante señalar que si el rayo cósmico es un núcleo pesado como el hierro en lugar de un protón entonces se precisa que su energía sea unas 10 veces más grande para que las colisiones con la radiación de fondo sean inelásticas y le roben energía. Por tanto, la presencia de una supresión en el espectro de los rayos cósmicos a energías por encima de $5 \cdot 10^{10}$ GeV sugeriría que el primario es un protón, mientras que su ausencia favorecería a los núcleos pesados. Los datos, de momento, no son concluyentes.

Es ahora evidente cómo aparecen los neutrinos cosmogénicos: en la desintegración de neutrones y piones cargados crea-

dos en las colisiones de los rayos cósmicos ultraenergéticos con la radiación de fondo. Se estima que el flujo de neutrinos cosmogénicos, con energía alrededor de 10^9 GeV, sería muy débil, de apenas 100 neutrinos por km^2 y año. Sin embargo, podría ser detectable gracias a una razón principal: a altísimas energías, las interacciones de un neutrino dejan de ser extremadamente débiles, y la probabilidad de que uno de esos neutrinos choque con la materia aumenta de modo considerable. Si se precisan billones de neutrinos de 1 GeV para que uno choque al recorrer 1 km de hielo, cuando su energía es de 10^{10} GeV chocaría uno de cada cien. Por esta razón, experimentos como ANITA (*Antarctic Impulsive Transient Antena*) esperan detectarlos en el hielo ártico y LUNASKA (*Lunar UHE Neutrino Astrophysics using the Square Kilometer Array*) espera ver algún rastro en la superficie de la Luna.

¿QUÉ PODEMOS HACER CON LOS NEUTRINOS DE MUY ALTA ENERGÍA?

Telescopios de neutrinos como IceCube registran deposiciones de energía superiores a 100 GeV en el interior de un gran volumen de hielo localizado 2 km por debajo de la superficie. El entorno donde eso ocurre es extremadamente limpio, ya que pocas partículas que conozcamos pueden alcanzar tal profundidad sin ser antes absorbidas. Los neutrinos de baja energía procedentes del Sol o de la atmósfera llegan ciertamente al detector en gran número e interactúan en su interior, pero las pequeñas deposiciones de energía que producen son fácilmente ignorables. También los muones de alta energía producidos en la atmósfera pueden alcanzar profundidades de varios kilómetros en el hielo, pero es posible distinguir esos sucesos ya que se advierte su traza de ionización al atravesar desde fuera hacia dentro el límite de la región monitorizada. El resto de partículas estándar o bien decaen o bien son absorbidas antes de alcanzar el detector. Es decir, si observamos un suceso con una duración de unos 20 nanosegundos que se inicia en el interior del detector y en el que

EL EXTREME UNIVERSE SPACE OBSERVATORY (JEM-EUSO)

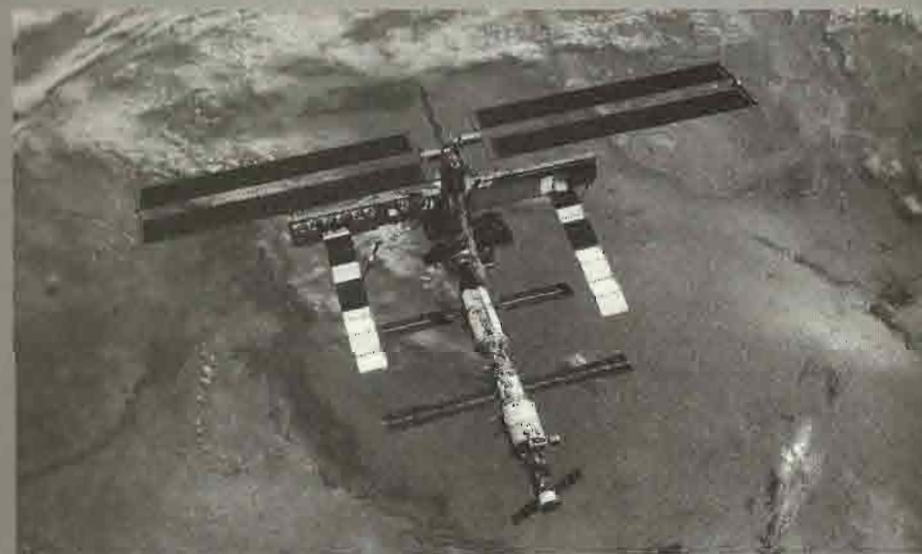
EUSO es un proyecto para la detección desde el espacio de los rayos cósmicos y los neutrinos de energía extrema: por encima de $5 \cdot 10^{16}$ GeV. Inicialmente estuvo programado como una misión de la ESA (European Space Agency), pero en 2004 dificultades programáticas y financieras llevaron a dicha agencia a abandonar el proyecto. La misión fue entonces retomada por la agencia espacial japonesa, que aceptó la incorporación del observatorio al módulo JEM (Japanese Experiment Module) de la Estación Espacial Internacional. Desde el año 2013, el proyecto cuenta con el apoyo de la NASA y la participación de unos 280 investigadores en 77 instituciones de 13 países; podría empezar a tomar datos en 2017.

Sensible a la luz de fluorescencia

JEM-EUSO será capaz de detectar la entrada en la atmósfera de partículas de energía extrema. En particular, su objetivo es divisar desde la EEI la luz de fluorescencia que se produce cuando el nitrógeno atmosférico choca con los millones de partículas cargadas creadas en el interior de una cascada extensa. La cantidad de luz generada sería similar a la de una bombilla de 40 vatios que durante una milésima de segundo cruzase la atmósfera a gran velocidad.

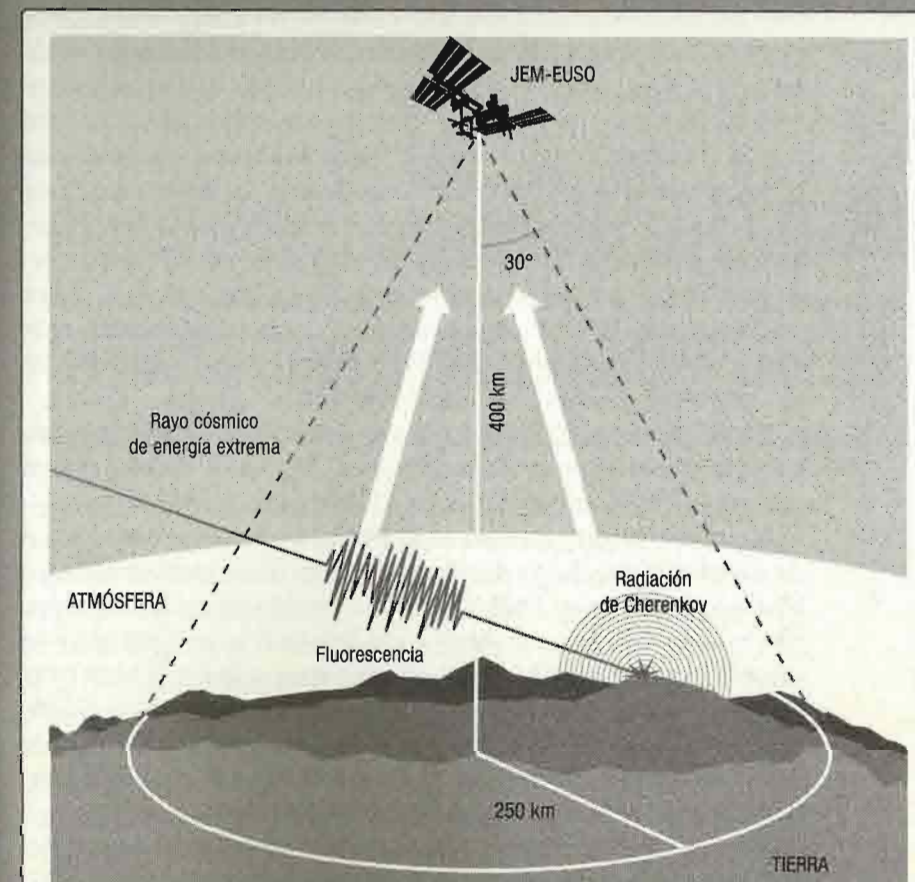
Visión de pájaro

Desde su localización privilegiada a unos 400 km del suelo, JEM-EUSO dominará un gran volumen de atmósfera (véase la figura). Ello le permitirá estudiar con mayor estadística que



La Estación Espacial Internacional.

los observatorios de superficie al límite GZK y acceder a energías jamás detectadas. Además, la observación del desarrollo de la cascada atmosférica desde arriba posibilita la búsqueda de sucesos que se inician con retraso, en los que la primera interacción con el aire se produce tras haber recorrido una gran cantidad de atmósfera. Ello indicaría que el rayo cósmico primario es un neutrino.



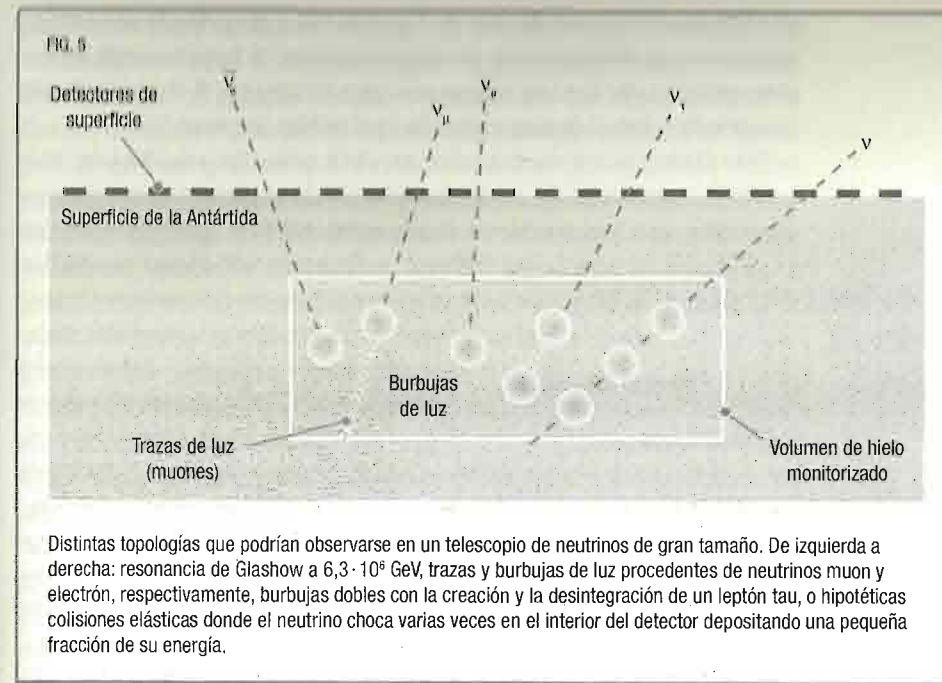
JEM-EUSO podrá detectar pequeñas cantidades de luz de fluorescencia en la atmósfera sobre una superficie de unos 250 km de radio.

se deposita una gran cantidad de energía, necesariamente debe estar generado por un neutrino de alta energía o bien por física más allá del modelo estándar. En los telescopios de neutrinos, el «ruido» es casi inexistente: todo suceso de muy alta energía es una señal, en el sentido de que debe ser interpretado de una u otra forma.

¿Y qué tipo de sucesos podríamos esperar por encima de 10^6 GeV y hasta las energías típicas de los neutrinos cosmológicos? Antes de nada hay que señalar que serían necesarios volúmenes de agua o de hielo superiores a los que se dan en IceCube o KM3NeT. Aunque existen planes para doblar el tamaño de IceCube hasta alcanzar los 2 km^3 , para acceder a los neutrinos cosmológicos el volumen adecuado podría estar más cerca de los 10 km^3 . La razón principal es que el número de sucesos registrados aumenta con el tamaño, y el flujo de neutrinos que llega a la Tierra con esas energías es extremadamente débil. Otra ventaja que se obtiene con un mayor tamaño es que permite una mejor caracterización de cada suceso, por ejemplo, distinguir si se trata de un suceso con o sin muon tras la colisión.

Supongamos por un momento que tenemos a nuestra disposición un telescopio con el tamaño ideal. Alguna de la física nueva que se podría buscar con él sería la siguiente.

En primer lugar, podríamos observar la llamada *resonancia de Glashow*, un efecto propuesto por el físico estadounidense Sheldon Glashow en 1960. Cuando la energía de un antineutrino electrónico ($\bar{\nu}_e$) está en torno a $6,3 \cdot 10^6$ GeV la probabilidad de que choque con los electrones presentes en el hielo se hace muy grande, mucho mayor que la de interactuar con protones y neutrones. En esa colisión el antineutrino y el electrón se aniquilan para formar una resonancia, el bosón W^- , que al desintegrarse instantáneamente da hadrones, los cuales son absorbidos en unos pocos metros de hielo. Para que aparezca la resonancia, sin embargo, es necesario que la energía del antineutrino incidente esté muy próxima al valor señalado, lo que reduce la frecuencia de este tipo de sucesos. Si analizamos los datos de alta energía obtenidos en IceCube, con el tamaño actual del detector se esperarían en torno a dos sucesos de este tipo durante los tres años



en los que ha venido operando, aunque el hecho es que todavía no se ha registrado ninguno. Observar la resonancia de Glashow a $6,3 \cdot 10^6$ GeV será crucial: permitirá calibrar el detector de modo muy preciso y establecer el flujo de antineutrinos electrónicos ($\bar{\nu}_e$) que llegan a la Tierra (figura 5).

En segundo lugar, podríamos establecer el flujo total de neutrinos cosmológicos. En concreto, podríamos distinguir entre los distintos sabores, electrón, muon o tau, de los neutrinos presentes en dicho flujo. El neutrino electrónico solo da sucesos con topología de burbuja, el neutrino muónico da sucesos con la traza característica de un muon en el estado final, mientras que a esas energías el neutrino tauónico produciría una nueva topología: dos grandes burbujas de luz separadas por unos cientos de metros, la primera de ellas en el lugar de la colisión y la segunda en el punto donde el leptón tau producido anteriormente se desintegra. Ello se debe a que un tau de, por ejemplo, 10^7 GeV dilata

su vida media por un factor de Lorentz muy grande, de modo que recorre unos 800 m antes de desintegrarse. A baja energía la desintegración del leptón tau se produciría antes, y los dos sucesos (su producción y desintegración) no serían separables.

Por último, un gran detector serviría también para buscar física exótica solo visible en las colisiones de la altísima energía que experimentan los neutrinos cosmogénicos. Por ejemplo, podrían

darse colisiones elásticas mediadas por nuevas fuerzas en las que el neutrino cede tan solo una pequeña fracción de energía al protón del medio y continúa su marcha, pudiendo repetir el proceso varias veces. Los telesco-

pios de neutrinos ofrecerían la posibilidad de comprobar si hay nueva física a energías todavía no exploradas en colisionadores.

El hombre ha mirado siempre a su alrededor intentando entender el mundo que le rodea. Algunas de las cosas que ha visto, como el Sol, la Luna o las estrellas, han sido evidentes desde un principio. Durante milenios esas cosas han sido interpretadas de una u otra forma, hasta que el desarrollo de la ciencia en tiempos de Galileo y de Newton nos permitió una búsqueda sistemática de las leyes que las gobiernan. El método científico se ha basado en hacer en cada momento la pregunta adecuada, es decir, aquella que puede ser contrastada con un experimento. Es un método modesto pero progresivo, de pasos cortos pero sobre un piso firme, lo que nos ha permitido recorrer grandísimas distancias en tan solo 400 años. En el camino hemos ido descubriendo otros muchos fenómenos menos evidentes, como la electricidad, la radiactividad o la relatividad, que nos han ayudado a obtener una imagen más completa de la naturaleza y de nuestro lugar en ella.

Los rayos cósmicos son otro de esos fenómenos poco evidentes. Observamos que todo lo que nos rodea está hecho de partículas elementales: la materia ordinaria está hecha de electrones, protones y neutrones combinados en átomos y moléculas, mientras que la radiación incluye también a los fotones y a los neutrinos. En los rayos cósmicos encontramos a todas esas

partículas pero con una energía que puede llegar a ser miles de millones de veces más grande que la que tienen normalmente. Desde casi el principio resultó evidente que los rayos cósmicos tienen un origen realmente lejano, que son algo ajeno a la Tierra y que no tienen nada que ver con una estrella apacible como nuestro Sol. El lugar del que proceden debe verdaderamente ser muy distinto de lo que observamos a nuestro alrededor. Su estudio continuo durante más de 100 años nos ha ayudado a imaginar cómo son esos lugares: supernovas, púlsares, quásares o brotes de rayos gamma, donde la naturaleza alcanza sus situaciones más extremas.

Ese estudio también nos reveló algunos de los secretos guardados por las altas energías, como la existencia de antipartículas o de una réplica pesada del electrón, el muon. Despertaron en nosotros el ansia por alcanzar energías más y más altas que desde entonces nos ha acompañado, siempre con la esperanza de encontrar descripciones cada vez más simples de las leyes naturales. Hoy como hace cien años, los rayos cósmicos nos muestran que existen lugares por descubrir y cuestiones por contestar.

Si una teoría es bella, al final resulta útil.

MURRAY GELL-MANN

- ACZEL, A.D., *Las guerras del uranio. Una rivalidad científica que dio origen a la era atómica*, Barcelona, RBA, 2012.
- BATTANER, E., *Física de las noches estrelladas. Astrofísica, relatividad y cosmología*, Barcelona, Tusquets Editores, 2011.
- : *Hubble. La expansión del Universo*, Barcelona, RBA, 2013.
- CLAY, R., DAWSON, B., *Balas cósmicas: partículas de alta energía en astrofísica*, Barcelona, Editorial Reverté, 2000.
- FARMELO, G. (ed.), *Fórmulas elegantes. Grandes ecuaciones de la ciencia moderna*, Barcelona, Tusquets Editores, 2004.
- FERNÁNDEZ-VIDAL, S., MIRALLES, F., *Desayuno con partículas*, Barcelona, Plaza & Janés Editores, 2013.
- HAWKING, S., *Historia del tiempo*, Barcelona, Editorial Crítica, 2011.
- LARA, L.G., *Introducción a la física del cosmos*, Granada, Editorial Universidad de Granada, 2008.
- PASTOR, S., *Los neutrinos*, Madrid, CSIC/Los Libros de la Catarata, 2014.

- AMS 11, 76
 ángulo cenital 23, 40
 Anomalía del Atlántico Sur 27, 30, 31
 Antares (estrella) 60
 ANTARES (telescopio de neutrinos) 11, 118
 antimateria 19, 73-76
 astropartícula 8-12, 108, 111-114, 125
 atmósfera 7, 10-13, 16, 20, 22, 23, 26, 27, 29, 33, 34, 36, 37, 39-41, 44, 46, 47, 60, 71, 86-88, 119, 135-137
 Auger, observatorio 11, 87, 129
 barión 38-40, 42, 73-76
 principal 40, 42, 112
 Bevatrón 9
 Big Bang 53-55, 74-76, 117, 132
 bosón
 W⁻ 126, 127, 128, 138
 Z 126, 127, 130
bremsstrahlung 41, 45
 brote de rayos gamma 100, 119, 141
 calorímetro 11
 cámara de niebla 18
 camino aleatorio 62-64
 campo magnético 8, 17, 18, 24, 25, 27-29, 32, 63, 69-73, 92, 94, 95, 98-105, 108, 109, 112-115, 120
 Carrington, Suceso 29
 cascada atmosférica 12, 13, 20, 36, 37, 39-41, 44, 46, 47, 87, 119, 125, 128, 129, 136, 137
 centro de masas 86, 88
 cinturones de Van Allen 27-29

color 37-39, 42, 43
 contador de Geiger-Müller 17
 Cosmotrón 9

difusión 63, 70, 116
 Dirac, Paul 18-20, 74
 DUNE 126

electrón 8-10, 15, 16, 18, 20, 27, 29, 32, 37, 38, 41, 44, 45, 51, 52, 58, 59, 69, 70, 73, 77, 92, 97, 99, 102, 103, 112, 114-118, 120, 124, 127, 128, 130, 131, 138, 140, 141
 electroscopio 16, 17, 21
 espectro 7, 8, 12, 76, 81-85, 89, 90, 96, 98, 99, 103, 104, 108, 111, 114, 128, 134
 espejo magnético, efecto 25, 27
 este-oeste, efecto 25
 estrella de neutrones 77, 100-103, 112, 119, 124, 141
 Euclid 126

Fermi, Enrico 18, 90, 94, 97
 burbuja de 120, 123
 fermi (femtómetro) 37
 mecanismo de 92
 fondo de microondas 117, 132, 134
 fotón 8, 9, 12, 16, 20, 37, 38, 41, 42, 45, 54, 74, 87, 102, 103, 111-117, 119, 120, 124, 130, 132, 134, 140
 gas interestelar 12, 65, 67, 98, 104, 124

GeV (gigaelectronvoltio) 8, 18, 26, 29, 32-36, 39-41, 44, 46, 69, 72-75, 77, 81-83, 86-88, 98-105, 108, 112-114, 116, 117, 119, 125, 128-130, 132, 134-136, 138, 139
 Glashow, resonancia 138, 139
 gluon 38, 42, 43
 GZK, límite/efecto 132, 134, 137

hadrón 38, 40, 42, 44, 46, 112, 138
 heliosfera 32, 60
 HESS 124, 125

IceCube 11, 118, 126, 127, 129, 135, 138
 interacción fuerte 37, 38, 42, 53
 ionización 15, 16, 29, 34, 135
 isotropía 49, 61

JEM-EUSO 11, 136, 137
 JPAS 126

kaón 38-40, 42
 KM3Net 11, 129, 133, 138

leptón 40, 42, 73, 75, 112, 124, 127, 139, 140
 ley de potencias 7, 81, 84, 85, 90, 91, 96
 LHC 37, 88
 llamarada solar 29
 longitud de interacción
 hadrónica 39
 LUNASKA 11, 135

MAGIC 124, 135
 magnetosfera 25, 28, 29, 32
 manchas solares 32, 33
 materia oscura 10, 65, 77, 117, 118, 120
 mesón 38-40, 75
 MeV (megaelectronvoltio) 18, 27, 29, 41, 54, 58, 111, 112
 muon 18, 20, 40, 41, 44, 73, 113, 124, 127, 128, 135, 138, 139, 141

neutrino cosmogénico 129, 134, 135, 138-140
 neutrinos 8, 10-12, 40, 41, 56, 58, 69, 70, 73, 89, 108, 109, 111-118, 124, 126-131, 133, 135-140
 neutrón 18, 38-40, 46, 51, 54, 55, 58, 69, 71, 73-75, 99, 101, 112-114, 118, 127, 131, 132, 134, 138, 140

NEXT 126
 núcleo activo de galaxia 101, 104-106, 108, 124
 núcleos atómicos 8, 10, 16, 18, 20, 29, 32, 34, 35, 37, 38, 40-42, 44-46, 51-60, 65, 67-72, 86, 92, 98, 100, 101, 105, 119, 125, 131, 134
 número
 atómico 51-53, 98
 másico 38, 44

PAMELA 27, 76
 Pauli, Wolfgang 19, 116
 pion 38-43, 73, 112-114, 124, 129, 132, 134

polvo interestelar 12, 65, 67, 104, 106, 107
 pomerón 42, 43
 positrón 8, 9, 18, 20, 41, 44, 74, 76, 77, 99, 103, 113, 117
 profundidad entre dos puntos (o atmosférica) 20, 22, 23, 41, 44, 47, 67, 68
 protón 8, 10, 18, 26, 27, 29, 32, 34, 37-44, 46, 47, 51, 54, 55, 58, 66, 68, 69, 72-75, 84, 86-88, 92-95, 97-102, 105, 112-114, 116, 117, 119, 124, 125, 127, 128, 131, 132, 134, 138, 140
 púlsar *véase* estrella de neutrones

quark 36-39, 42, 43, 130
 quásar 104-106, 112, 141

radiación ionizante 21, 35
 rayo
 cósmico 7-13, 15-18, 20, 21, 23, 24-27, 29, 32-39, 44, 46, 47, 49, 51-53, 55, 61, 63, 65, 67-73, 76, 79, 81-90, 92, 94-101, 103-105, 108, 111, 112, 115, 124, 128, 129, 132, 134-137, 140, 141
 gamma 8, 9, 16, 17, 21, 100, 102, 108, 109, 112, 114, 115, 117, 119, 120, 123-125, 141

SN1987A 116
 supernova 8, 9, 58-60, 89, 92, 94, 96, 98-101, 104, 108, 111, 112, 116, 120, 124, 141

tau (tautón) 124, 127, 139, 140

telescopios

de neutrinos 11, 118, 126-

129, 133, 135, 138-140

de rayos gamma 9, 108, 119,

124, 125

trayectoria balística 61, 62, 72

vida media 40, 41, 60, 69, 70,

113, 140

viento solar 38, 29, 32, 60

Los rayos cósmicos

Los rayos cósmicos de alta energía penetran en la atmósfera y desencadenan cascadas con millones de partículas secundarias. ¿Cuál es la naturaleza de esos rayos? ¿De dónde proceden? ¿Cómo adquieren esa inmensa energía? La búsqueda de respuestas durante los últimos cien años nos ha ido revelando una nueva imagen tanto del mundo subatómico como de nuestra galaxia y del universo lejano.

Manuel Masip es catedrático de Física Teórica en la Universidad de Granada.